

Hannes Timlin

BETONIN RAKENNUSKOSTEUDEN KUIVATUS VALUUN ASENNETULLA KOSTEUDENKERUUKANAVISTOLLA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Hannes Timlin: Betonin rakennuskosteuden kuivatus valuun asennetulla kosteudenkeruukanavistolla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Toukokuu 2019

Työssä tarkasteltiin valuun asennettavan, reiälliseen kosteudenkeruukanavistoon perustuvan, ilmakiertoisen kuivatusjärjestelmän toimintaa. Tavoitteena oli tarkastella järjestelmän kuivatuskapasiteettia ja vaikutusta rakenteiden kuivumisaikaan. Lisäksi tavoitteena oli saada lisää tutkimustietoa kuivatusjärjestelmällä varustetun lattiarakenteen oikea-aikaisesta päälylystämistä. Tutkimustiedon pohjalta tavoitteena oli arvioida, onko olemassa olevissa ohjejulkaisuissa esitettyjä raja-arvoja, mittausvyvyyksiä ja mittauskohtia tarkoituksenmukaista soveltaa suoraan kosteudenkeruukanavistolla varustetun rakenteen päälylystettävyyden arviointiin. Vai voidaanko joiltain osin käyttää ohjejulkaisuista poikkeavia kosteusraja-arvoja tai mittausvyvyyksiä.

Teoriaosuudessa tarkasteltiin betonin kosteustekniseen toimintaan liittyviä fysikaalisia ilmiöitä ja betonin kuivumiseen vaikuttavia päätekijöitä. Lisäksi käytiin läpi olemassa oleva tutkimustieto ja käyttökokemukset tarkasteltavasta kuivatusjärjestelmästä. Kokeellisessa osuudessa tutkittiin työmaolosuhteissa betonin kuivumista ja kosteuden jakaantumista kuivumisen eri vaiheissa. Tutkittavina rakenteita oli kahteen suuntaan kuivuva massiivinen välipohjarakenne sekä maanvastainen lämmöneristetty alapohjarakenne, joka päälylystettiin tiiviillä muovimattopäälylysteellä. Tarkasteltavissa rakenteissa oli käytetty valuun asennettua kosteudenkeruukanavistoa.

Kosteudenkeruukanaviston kautta betonista poistuvan kosteuden määrä oli molemmissa tutkittavissa rakenteissa kuivumisen kannalta merkittävä. Betonin kuivuminen kanaviston kautta jatkui rakenteen päälylystämisen jälkeenkin ja kuivumista tapahtui kanaviston kautta myös ympäröivien kuivatusolosuhteiden ollessa pintojen kautta tapahtuvalle kuivumiselle epäedulliset. Tiiviin betonilaadun havaittiin hidastavan kuivatusjärjestelmän kautta poistuvaa kosteusvirtaa.

Kosteudenkeruukanavistolla varustettuun rakenteeseen syntyvät kosteusjakaumat poikkesivat merkittävästi tavanomaisten betonirakenteiden kosteusjakautumista. Päälylystetyn kuivatusjärjestelmällä varustetun maanvaraisen betonilaatan suhteellinen kosteus arvosteluvyydellä jatkoi laskemistaan päälylystämisen jälkeen ja betonin pintakerroksen suhteellinen kosteus pysyi päälylystämishetkellä vallinneella tasolla.

Tutkimuksen mukaan kuivatusjärjestelmällä varustetulla rakenteella voidaan saavuttaa etua betonirakenteiden kuivumisajoissa ja lisäksi saavuttaa lisävarmuutta päälylystettäessä rakennetta kosteusherkällä päälylyste- tai pinnoitemateriaalilla. Kuivatettaessa paksun rakenteen keskipaksuutta, edesautetaan pintaosaa kuivumaan sisäilman lisäksi kuivempaan keskivyohtykeeseen ja siten nopeatetaan päälylystyskelpoisuuden saavuttamista. Täsmällisten raja-arvojen ja mittauskohtien määrittäminen eri rakenteille vaatii tulosten varmentamista lisätutkimuksin.

Avainsanat: betonin kuivuminen, kuivatusjärjestelmä, suhteellinen kosteus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Hannes Timlin: Drying of a construction moisture of a concrete slab with a drainage system based on a moisture collecting ductwork
Master of Science Thesis
Tampere University
Faculty of Built Environment
May 2019

This thesis investigated the operation of a drainage system based on a perforated moisture collecting duct. The aim was to examine the drying capacity of the system and the effect of the system on the drying time of the concrete structures. The secondary objective was to develop a guide to apply the existing published guidance to assess the coverage and effect of the system to drying concrete structures

In the theoretical part were examined the physical phenomena related to the moisture transfer in concrete and the main factors affecting to the drying of concrete. In addition, existing research data and experiences of the drainage system were reviewed. In the experimental section, the drying of the concrete and the distribution of moisture at different stages of drying were studied by *in situ* measurements in two building sites in southern Finland. The structures to be studied were massive concrete slab that can evaporate moisture from two surface and slab on ground floor, both of which was coated with a sealed plastic membrane during the study.

The amount of moisture dried of the concrete through the moisture collecting duct was significant in both structures. Drying of the concrete through the ductwork continued after the coating of the structure. Drying also continued through the ductwork, while the surrounding drying conditions were harmful to the surface drying. Concrete with higher strength grade was found to slow down the flow of moisture leaving the drying system.

The moisture distribution in the structure with the drainage system significantly differed from the moisture distribution of conventional concrete structures. The relative humidity of the slab on ground floor with a coated drainage system continued to reduce after coating. Relative humidity of the surface layer of the concrete remained at the same level prevailing the time of coating.

According to the study, the structures equipped with a drainage system can achieve an advantage in the drying times of concrete structures. In addition the drainage system provide additional security when coating the structure with a moisture-sensitive or water vapour resistance coating material. Using the system in thick structures the surface part of the structure is able to dry after the coating because the system dries the middle part of the structure. Determining the exact limit values and measuring points for different structures requires verification of the results by further research.

Keywords: drying of concrete, drying system, relative humidity

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön ohjausryhmän kokoamisesta ja rahoituksen hankinnasta vastasi Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n Sami Niemi. Työn ohjaajana ja päätarkastajana toimi Tampereen yliopiston rakennusfysiikan professori Juha Vinha ja työn toisena tarkastajana diplomi-insinööri Pauli Sekki. Tutkimuksen rahoitukseen ja ohjausryhmään osallistuivat Niemen ja Vinhan lisäksi SafeDrying Oy, YIT Oyj, Helsingin kaupunki, Vantaan kaupunki sekä Suomen rakennusteollisuus RT ry.

Haluan kiittää kaikkia ohjausryhmään osallistuneita henkilöitä ja rahoitukseen osallistuneita tahoja, jotka ovat mahdollistaneet tutkimuksen tekemisen. Erityisesti haluan kiittää SafeDrying Oy:n Esa Tommolaa ja Vahasen Sami Niemeä työn ohjaamisesta, tuesta ja työn asiasisällön ansiokkaasta kommentoinnista. Kaikkein suurimmat kiitokset kuitenkin rakkaalle vaimolleni Aadalle, jonka loputtomasta tuesta ja kannustuksesta on ollut suunnaton apu diplomityöprojektin loppuun saattamisessa.

Tampereella, 28.5.2019



Hannes Timlin

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Tausta.....	1
1.2	Tavoite	3
1.3	Tutkimuksen sisältö ja rajaukset	3
2	BETONI	5
2.1	Yleistä betonista	5
2.1.1	Betonin valmistuksen raaka-aineet	6
2.1.2	Betonin sitoutuminen ja kovettuminen	7
2.2	Betonilaatan kosteustekninen toiminta	8
2.2.1	Kosteuden sitoutuminen betoniin	9
2.2.2	Betonin sitoutumis- ja haihtumiskuivuminen.....	14
2.2.3	Betonilattian kuivumiseen vaikuttavat tekijät	16
2.3	Lattianpäällyste- ja pinnoitevauriot	18
3	KOSTEUDENHALLINTA	20
3.1	Lainsäädäntö.....	20
3.2	Betonilattian riittävän kuivuuden toteaminen	22
3.2.1	Olemassa oleva ohjeistus ja raja-arvot.....	22
3.2.2	Kosteusmittausmenetelmät.....	24
3.2.3	Kuivumisaika-arviot.....	30
3.2.4	Rakennusfysikaalinen mallintaminen	32
3.3	Tarkasteltava kuivatusjärjestelmä.....	33
3.3.1	Taustaa	33
3.3.2	Järjestelmän kuvaus	34
3.3.3	Järjestelmän kuivattava vaikutus	36
3.3.4	Aiemmat tutkimukset ja käyttökokemukset	38
3.3.5	Lattialämmitetyn rakenteen rakennusfysikaalinen toiminta.....	41
4	KENTTÄTUTKIMUKSET	42
4.1	Koekohteet ja mittausjärjestelyiden suunnittelu.....	42
4.1.1	Koekohde A.....	42
4.1.2	Koekohde B	43
4.2	Kuivatusjärjestelmä	44
4.2.1	Toimintaperiaate	44
4.2.2	Kuivatuskalusto	45
4.2.3	Kosteudenkeruukanavisto	46
4.3	Mittausmenetelmät ja mittalaitteet	47
	Mittauspaikat ja -syvyydet	48
4.3.1	Mittausalueet	48
4.3.2	Mittausyvytydet- ja vaakaetäisyydet	51
4.4	Koe- ja mittausjärjestelyt	53
4.4.1	Koe- ja mittausjärjestelyt ennen valua	53

4.4.2	Lattiabetonointi ja jälkihoito	54
4.4.3	Kuivatuslaitteiston käyttö.....	55
4.4.4	Lattianpäällysteasennukset.....	56
4.5	Koekohteiden kosteudenhallinta	57
4.5.1	Koekohde A.....	58
4.5.2	Koekohde B	60
4.6	Mittausten suorittaminen.....	63
4.6.1	Koekohde A.....	63
4.6.2	Koekohde B	65
4.7	Koejärjestelyiden kokemukset ja työmailta saatu palaute järjestelmästä	67
5	MITTAUSTULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	70
5.1	Koekohde A.....	70
5.1.1	Kuivatuslaitteiston käyntiajat	70
5.1.2	Kuivumisolosuhteet	71
5.1.3	Meno- ja paluuilman olosuhteet ja kosteusvirta	75
5.1.4	Betonin suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys.....	80
5.1.5	Lattianpäällysteen kiinnitysliimakerroksen kosteuspitoisuus	84
5.1.6	Aistinvaraiset havainnot tarkastelujakson jälkeen	86
5.2	Koekohde B.....	88
5.2.1	Kuivumisolosuhteet	88
5.2.2	Meno- ja paluuilman olosuhteet ja kosteusvirta	90
5.2.3	Betonin suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys.....	93
5.2.4	Kosteusjakaumien kehittyminen eri mittausvyöhykkeillä	99
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	102
6.1	Koejärjestelyiden ja mittauksen onnistuminen	102
6.2	Mittauksien pohdinta ja jatkotutkimustarpeet	103
6.3	Sovellusohjeet päällystettävyyden arviointiin.....	107
6.4	Kuivatusjärjestelmän toimivuus, sovelluskohteet sekä kehitysehdotukset	109
	LÄHTEET	112
	LIITTEET.....	114

KÄSITTEET JA SYMBOLIT

Adheesio	Aineen molekyylien ja ympäröivien molekyylien välinen vetovoima. Esimerkiksi liimojen ja laastien tartunta perustuu kahden aineen väliseen adheesioon.
Diffuusio	Molekyylien liike, joka pyrkii tasoittamaan nesteessä, kaasussa tai kiinteässä aineessa olevat pitoisuuserot. Molekyylit pyrkivät siirtymään aina suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen.
Hygroskooppisuus	Huokoisen aineen kyky sitoa itseensä ympäröivästä ilmasta vesihöyrymuodossa olevaa kosteutta ja luovuttaa sitomaansa kosteutta takaisin.
Hygroskooppinen tasapainokosteus	Kosteuspitoisuus, joka sitoutuu stationääritilassa huokoiseen aineeseen ympäröivästä ilmasta tai materiaalista tietyssä suhteellisessa kosteudessa.
Johtuminen	Aineen sisäisen molekyylien välisen vuorovaikutuksen aiheuttama lämmönsiirtymisilmiö, jossa aineen tai materiaalin lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan. Matemaattisesti tarkasteltuna johtuminen on analoginen ilmiö diffuusion kanssa.
Kapillaarisuus	Materiaalin kyky imeä ja siirtää nestettä kapillaarihuokosten avulla. Kapillaarinen imu muodostuu nestemolekyylien ja materiaalien huokosseinämien välisten vetovoimien (adheesio ja koheesio) yhteisvaikutuksesta.
Koheesio	Aineen sisäisten molekyylien välinen vetovoima. Ainetta koossa pitävä vetovoima.
Konvektio	Ilmiö, jossa lämpö tai aine siirtyy virtaavan väliaineen kuljetta- mana.
Kosteus	Kemiallisesti sitoutumatonta vettä kaasumaisessa, nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa.
Kyllästyskosteuspitoisuus	Suurin mahdollinen vesihöyrynmäärä, jonka ilma pystyy sitomaan tietyssä lämpötilassa. Lämpötilan laskiessa tai vesihöyrymäärän lisääntyessä vesi alkaa tiivistyä nestemäiseksi. Kyllästyskosteuspitoisuus on voimakkaasti lämpötilariippuvainen.

Lattiapinnoite	Lattiapinnoite on lattian pintakerros, joka on asennushetkellä nestemäisessä olomuodossa ja kovettuu käytönaikaiseen kiinteään olomuotoon kemiallisten reaktioiden seurauksena. Lattiapinnoitteita ovat esimerkiksi nestemäiset epoksi- tai PUR-pinnoitteet.
Lattiapäällyste	Lattiapäällyste on lattian pintakerros, joka on asennushetkellä kiinteässä olomuodossa. Lattiapäällysteet asennetaan yleensä erillisen kiinnitysliiman tai kiinnityslaastin avulla alustaansa. Osa lattianpäällysteistä voidaan asentaa myös vapaasti ilman kiinnitysliima- tai kiinnityslaasti kerrosta. Esimerkkejä lattiapäällysteistä ovat esimerkiksi muovimatot, keraamiset laatoitukset tai kelluvat parketit.
Rakennuskosteus	Rakennuskosteudella tarkoitetaan rakennusvaiheen aikana tai sitä ennen rakenteisiin tai rakennusmateriaaleihin joutunutta rakennuksen käytönaikaisen tasapainokosteuden ylittävää kosteutta, jonka on poistuttava.
Suhteellinen kosteus [%]	Ilmoittaa ilman sisältämän absoluuttisen kosteuden suhteessa kyseisessä lämpötilassa vallitsevaan kyllästyskosteuspitoisuuteen. Lyhenne RH tulee sanoista relative humidity.
Vesi-sementtisuhte [v/s]	Betonimassaan sekoitusvaiheessa käytetyn veden massan suhde sementin massaan. Vesi-sementtisuhteella on merkittävä vaikutus betonin lujuuteen, kuivumisaikaan ja notkeuteen.

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Betonilattioiden kosteudenhallintaan on kiinnitetty voimakasta huomiota viime vuosina. Kehitystä on tapahtunut etenkin kosteusmittausten luotettavuuteen vaikuttavien tekijöiden osalta (Niemi, 2019). Betonilattioissa on kehityksestä huolimatta edelleen jonkin verran betonin kosteudesta johtuvia ongelmia. Joskus betonilattioiden liiallinen kosteus valmiissa rakenteissa johtaa lattianpäällystemateriaalien tai niiden kiinnitysliimojen vaurioitumiseen. Uudehkoissa lattiarakenteissa esiintyvä ylimääräinen kosteus on useimmiten betonin rakennuskosteutta, jonka ei ole annettu poistua riittävästi ennen tiiviin lattianpäällystemateriaalin asennusta. Ongelmia esiintyy erityisesti julkis- ja toimitilarakentamisessa, jossa korkeiden kulutuskestävyysvaatimusten vuoksi käytetään kaikkein tiiveimpiä usein polyuretaanipintaisia muovipäällysteitä.

Betonilattioiden päällystevaurioilla on sekä terveydellisiä, että taloudellisia vaikutuksia. Liian korkeassa suhteellisessa kosteudessa kiinnitysliiman sideaineissa tai päällystämateriaaleissa voi käynnistyä kemiallinen hajoamisreaktio tai mikrobikasvu. Hajoamisreaktiossa vapautuvat kemialliset yhdisteet heikentävät sisäilman laatua ja voivat aiheuttaa terveyshaittoja tilojen käyttäjille. Lisäksi liian korkea kosteuspitoisuus voi aiheuttaa värimuunnoksia tai kuplimista lattianpäällystemateriaalissa ja heikentää lattianpäällysteen tartuntaa betonialustaan (Keinänen, 2013).

Lattianpäällystevaurioiden korjaaminen on usein varsin monivaiheinen prosessi sisältäen vanhojen päällystemateriaalien purun, mahdollisesti tasoitteen ja joissain tapauksissa myös pintabetonin jyrinnän, betonirakenteen kuivatuksen ja uuden lattianpäällysteen asennuksen. Yleensä päällystevauriot paljastuvat vasta rakennuksen käyttöön oton jälkeen, jolloin suorien purku- ja korjauskustannusten lisäksi korjauksista aiheutuu myös tilojen toimintojen keskeytyksestä aiheutuvat kulut. Edellä mainituista syistä johtuen betonilattioiden korjauskustannukset ovatkin yksi merkittävimmistä urakoitsijan takuun piiriin kuuluvista korjauskustannuksista. Lattianpäällystevaurioiden aiheuttamien kustannusten on todettu olevan usein moninkertaisia verrattuna alkuperäisiin päällysteen asennuskustannuksiin (Merikallio, 2009).

Rakennusalalla betonilattioiden ongelmien arvellaan johtuvan monien eri tekijöiden summasta. Kiristyneet rakentamisaikataulut vaativat huolellisempaa kosteudenhallintaa, johon oleellisena osana kuuluu betonin kuivumisen seuranta ja riittävän kuivumisen todentaminen luotettavin rakennekosteusmittauksin. Kosteusmittauskäytännöissä on kuitenkin

havaittu suuria laadullisia eroja ja mittaustuloksiin ja tulkintaan jää liian usein suurta epävarmuutta (Merikallio, 2009). Sen seurauksena saatetaan päätyä tilanteeseen, jossa lattianpäällyste asennetaan liian kostealle betonialustalle. Lisäksi yleinen oletama rakennus-alalla on, että muutokset lattianpäällystemateriaalien ja kiinnitysliimojen kemiallisissa ominaisuuksissa niiden asennusturvallisuuden ja päästöjen vähentämiseksi ovat heikentäneet erityisesti kiinnitysliimojen kosteudenkesto-ominaisuuksia. Olettaman tueksi ei löydy tällä hetkellä tieteellistä tutkimusta.

Tavanomaisen betonirakenteen kuivuminen tapahtuu haihtumalla rakenteen pintojen kautta. Tästä syystä on luonnollista, että betonirakenne kuivuu nopeimmin pinnoilta, syvemmällä rakenteessa kosteuspitoisuuden ollessa vielä korkeampi. Perinteinen lattiarakenne voi kuivua joko kahteen suuntaan, kuten massiivinen välipohjarakenne tai yhteen suuntaan, kuten maanvarainen alapohja. Erityisesti yhteen suuntaan kuivuvan rakenteen kuivumista hidastaa merkittävästi rakenteen päällystäminen vesihöyrytiiviillä lattianpäällystemateriaalilla. Päällystämisen jälkeen betonirakenteen kosteusjakauma tasaantuu, siten, että betonissa oleva kosteus jakautuu tasaisesti koko rakenteen paksuudelle.

Markkinoille on viime vuosina tullut betonilattioille kehitetty ilmakiertoinen kuivatusjärjestelmä, jonka kosteudenkeruukanavisto on reiällistä muoviputkea. Kanavistoon johdettu kuiva ja lämmin ilma pystyy sitomaan betonirakenteen kosteutta itseensä ja kuljettamaan sen pois rakenteesta. Kuivatusjärjestelmällä varustettu rakenne poikkeaa merkittävästi rakenteen kuivumisominaisuuksiltaan perinteisistä yhteen ja kahteen suuntaan kuivuvista betonilattioista. Kyseisellä järjestelmällä voidaan mahdollisesti pienentää lattianpäällystevaurioiden syntymisen riskiä tai päästä lyhyempiin betonilattian kuivumisaikoihin. Järjestelmän toiminnasta tarvitaan lisää luotettavaa tietoa sekä selkeää näyttöä sen vaikutuksista betonin kuivatusaikoihin, jotta sitä voidaan tutkittuun tietoon perustuen markkinoida betonirakennetta kuivattavana järjestelmänä.

Betonilattian riittävä kuivuminen ennen lattianpäällysteen asennusta todennetaan yleisesti betonin suhteellisen kosteuden mittauksilla tietyltä arviointisyvyydeltä. Olemassa olevassa ohjeistuksessa päällystettävyyden raja-arvot arviointisyvyydellä on määritetty lattianpäällystemateriaaleittain ja mittaussyvyys määrittyy rakenteen paksuuden ja kuivumissuuntien mukaan. Työssä tarkasteltavassa betonilattiarakenteessa kosteuden haihtuminen pintojen lisäksi myös kosteudenkeruukanaviston kautta muuttaa rakenteeseen syntyviä, sekä pysty- että vaakasuuntaisia, kosteusjakautumia verrattuna perinteisiin lattiarakenteisiin. Tarkasteltavalla järjestelmällä varustetun lattiarakenteen päällystettävyyden arviointi vaatii tutkimuksiin perustuvia olemassa olevan ohjeistuksen sovellusohjeita kosteusmittausten suorittamiseen ja erityisesti mittaussyvyyden ja mittauskohdan valintaan.

1.2 Tavoite

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tuottaa lisätietoa tarkasteltavan järjestelmän kyvystä kuivattaa betonin rakennusaikaista kosteutta sekä kyvystä kuivattaa rakennetta vesihöyrytiivin lattiapäällysteen/ pinnoitteen asentamisen jälkeen. Tutkimustulosten avulla pyritään arvioimaan järjestelmän vaikutuksia betonirakenteen kuivumisaikoihin ja mahdollisiin lattiapäällystevaurioiden syntymiseen.

Osatavoitteena on saada tutkimustietoa tarkasteltavalla kuivatusjärjestelmällä varustetun lattiarakenteen oikea-aikaisesta päällystämisestä. Tutkimustiedon pohjalta tavoitteena on arvioida, voidaanko olemassa olevissa ohjejulkaisuissa *Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet 2007* ja *RT 14-10984 Betonin suhteellisen kosteuden mitta*us esitettyjä raja-arvoja, mittausvyvyksiä ja mittaushavaintoja soveltaa suoraan kosteudenkeruukanavistolla varustetun rakenteen päällystettävyyden arviointiin. Vai voidaanko joiltain osin käyttää ohjejulkaisuista poikkeavia kosteusraja-arvoja tai mittausvyvyksiä.

1.3 Tutkimuksen sisältö ja rajaukset

Tarkasteltava kuivatusjärjestelmä on alun perin kehitetty lattialämmityksen lämmönjakokanavistoksi. Tässä diplomityössä ei tarkastella järjestelmän toimivuutta lämmönjakojärjestelmänä vaan keskitytään tarkastelemaan järjestelmän kykyä poistaa betonin rakennusaikaista kosteutta kosteudenkeruupiirien kautta ennen rakenteen päällystämistä ja päällystämisen jälkeen.

Teoriaosuus koostuu kirjallisuuskatsauksesta, jossa tarkastellaan ensin betonilattian kosteusteknisen toimintaan liittyviä fysikaalisia ilmiöitä sekä lattianpäällyste- ja pinnoitevaurioiden syntymekanismeja. Toiseksi tarkastellaan betonilattian kosteudenhallintaan liittyvää lainsäädäntöä, betonilattian riittävän kuivuuden toteamiseen liittyviä menetelmiä sekä olemassa olevaa kansallista ohjeistusta betonin suhteellisen kosteuden mittauksesta ja päällystettävyyden ja pinnoitettavuuden arvioinnista. Teoriaosuuden lopuksi tarkastellaan tarkasteltavan kuivatusjärjestelmän toimintaperiaatetta ja käydään läpi olemassa oleva tutkimustieto tarkasteltavasta kuivatusjärjestelmästä.

Tutkimuksen kokeellinen osuus suoritetaan koekohteiksi valituilla kahdella todellisella rakennustyömaalla. Käytännön kohteissa betonin kuivumista seurataan määräajoin useilta syvyyksiltä tehtävin betonin suhteellisen kosteuden mittauksin. Kosteusmittaukset tehdään pääosin näytepala- ja mittaputkimenetelmällä. Kosteusmittauksilla pyritään määrittämään rakenteen pysty- ja vaakasuuntaisia kosteusjakaumia kuivumisen eri vaiheissa. Mittauksia jatketaan myös rakenteen päällystystöiden jälkeen, jolloin voidaan seurata kosteusjakauman asettumista valmiissa rakenteessa. Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden seurantaa tehdään ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavilla tallentavilla mittalait-

teilla. Lisäksi vastaavilla mittalaitteilla mitataan kosteudenkeruupiirien meno- ja tuloilman olosuhteita. Meno- ja tuloilman olosuhteiden mittauksilla arvioidaan rakenteesta kuivatusjärjestelmän kautta poistuvan kosteuden määrää.

2 BETONI

2.1 Yleistä betonista

Eräässä lähteessä (Siikanen, 2001, s. 131) esitetyn varsin kuvaavan määritelmän mukaan betoni on ”keinotekoisesti valmistettua ”kiveä”, jota tehdään liittämällä irrallinen kiviaines veden ja jonkin sideaineen avulla kiinteäksi massaksi”. Betonin valmistus- ja muokkausvaiheessa ennen sitoutumistaan tuore betonimassa on nestemäisessä muodossa olevaa massaa. Sitoutumis- ja kovettumisvaiheessa vesi muodostaa yhdessä sementin kanssa niin sanotun sementtiliiman, joka sitoo runkoainepartikkelit toisiinsa ja betonimassa muuttuu kiinteäksi materiaaliksi. Betonin hydrataatioreaktioreaktion lopputuotteena syntyvällä kiinteällä betonilla on suhteellisen suuri puristuslujuus, mutta puristuslujuuteen nähden heikko vetolujuus. Betonirakenteiden heikkoa vetolujuutta kompensoidaan valettavien betonirakenteiden sisään sijoitettavilla terästangoilla tai betonimassaan sekoitettavilla kuiduilla, jotka ottavat vastaan rakenteeseen kohdistuvia vetorasituksia ja näin ollen mahdollistavat betonin rakenteissa, joihin kohdistuu myös vetorasituksia. (Neville, 1973).

Betoni on maailmanlaajuisesti tarkasteltuna eniten käytetty rakennusmateriaali (Betonitekniikan oppikirja by 201, 2018). Betonilla on muutamia poikkeuksellisia ominaisuuksia verrattuna moneen muuhun perusmateriaaliin. Betonin valmistusmenetelmä mahdollistaa materiaaliominaisuuksien kuten esimerkiksi lujuuden, muokattavuuden tai säänkestävyyden muokkaamisen varsin yksilöidysti käyttötarkoituksen mukaan. Rakenteen kestävyyttä voidaan optimoida mitoituslaskelmissa määritettyjen voimasuureiden mukaan esimerkiksi raudotteiden sijaintia ja määrää tai rakennepaksuutta muuttamalla. Betonin nestemäinen olomuoto ennen kovettumistaan mahdollistaa suhteellisen vapaat muodot (Siikanen, 2001). Muun muassa yllä kuvatut ominaisuudet tekevät betonista monipuolisen ja kustannustehokkaan materiaalivaihtoehdon, mikä selittää pitkälti betonin suosiota rakennusmateriaalina.

Yleisesti betonin perusominaisuuksina voidaan pitää betonin lujuus-, säilyvyys ja muokattavuusominaisuuksia (Neville, 1973). Tavanomaisesti betonilaadun valinta on tehty pitkälti näiden perusominaisuuksien perusteella. Erityisesti betonilattian kuivuminen on rakennustyömailla sisävalmistusvaihetta tahdistava työvaihe ja usein koko rakentamisaikataulu pohjautuu betonirakenteiden kuivumisaika-arvioihin. Pitkälti tämän myötä myös betonin kuivumisominaisuudet ovat alkaneet kiinnostaa rakennusalaalla yhä enemmän. Tämän tutkimuksen näkökulmasta betonin materiaaliominaisuuksia tarkastellaan erityisesti materiaalin kuivumisominaisuuksien kautta. Betoni on monimutkainen seos eri ainesosia ja betonireseptiin tehdyillä muutoksilla on yleensä vaikutusta useampiin betonin ominaisuuksiin, myös kuivumisominaisuuksiin. (Betonitekniikan oppikirja by 201, 2018).

2.1.1 Betonin valmistuksen raaka-aineet

Yleisesti betonin valmistuksen pääraaka-aineista käytetään nimityksiä runko-aines, sementti ja vesi. Betonin runko-aines toimii nimensä mukaisesti betonin runkomateriaalina. Sementistä ja vedestä koostuvan sideaineen tehtävänä taas on sitoa runkoainepartikkelit toisiinsa. Pääraaka-aineiden lisäksi betonin valmistuksessa voidaan käyttää seos- tai lisäaineita haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. (Betonitekniikan oppikirja by 201, 2018)

Runkoaines on tavanomaisesti määrättyssä suhteessa annosteltua hieno- ja karkearakeista kiviainesta. Kovettuneesta betonista runkoaineen tilavuusosuus on 65...80% ja tästä syystä runkoaineen ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin. Runkoaineen raekokojakaumalla ja raemuodolla on merkittävä vaikutus betonimassan koossapysyvyyteen ja lopputuotteen lujuuteen. Suomessa betonin runkoaineena käytetään lähinnä graniittipohjaisia luonnonkiviaineita. Käytössä on sekä kivennäismaalajeista seulomalla lajitellut luonnossorat, että kalliosta tai kivennäismaalajeista murskaamalla valmistetut kiviainekset. Erikoiskohteissa voidaan käyttää myös keinotekoisia materiaaleja, kuten kevytsoraa, kierrätysmateriaaleja, masuunikuonaa ym. (Betonitekniikan oppikirja by 201, 2018)

Sementti tarkoittaa sanan yleisessä merkityksessä materiaalia, joka pystyy adheesio- ja koheesio ominaisuuksiensa vuoksi sitomaan kappaleita yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Rakentamisessa sementillä tarkoitetaan kalkkipitoisia sideaineita, joita käytetään pääasiassa kivien, hiekan tiilien, tai harkkojen liittämiseen. Betonin valmistukseen käytetään lähinnä niin kutsuttuja hydraulisia sementtejä, jotka koostuvat pääasiassa kalkin silikaateista ja aluminaateista (Neville, 1973). Sementtilaadulla voidaan vaikuttaa muun muassa betonimassan kovettumisaikaan, kemiallisten rasitusten kestoon ja ulkonäköön.

Vesi on yksi betonin pääraaka-aineista. Yleistäen voidaan sanoa, että juomakelpoinen luonnon vesi tai vesijohtovesi, joka ei haise eikä näytä likaiselta soveltuu hyvin betonin valmistukseen. Myös betoniteollisuuden prosessissa talteen otettua kierrätysvettä voidaan useimmissa tapauksissa hyödyntää. Luonnon pintavesiä tai teollisuuden jätevesiä ei voida hyödyntää betonin valmistuksessa ilman erillisiä tutkimuksia. (Betonitekniikan oppikirja by 201, 2018)

Seosaineet ovat pääsääntöisesti teollisuuden sivutuotteina syntyviä hienojakoisia mineraalisia seosaineita, jotka osallistuvat veden ja sementin väliseen hydrataatioreaktioon. Seosaineilla voidaan korvata osittain betonin runko-ainesta ja sementtiä. Seosaineiden merkitys sementin tuotannossa on kasvanut ympäristötietoisuuden lisääntyessä. Suurin osa sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöistä syntyy kalkkikiven poltossa tapahtuvien kemiallisten reaktioiden seurauksena. Korvaamalla osa sementtiklinkkeristä seosaineilla voidaan vähentää sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöjä. Esimerkiksi Finn-

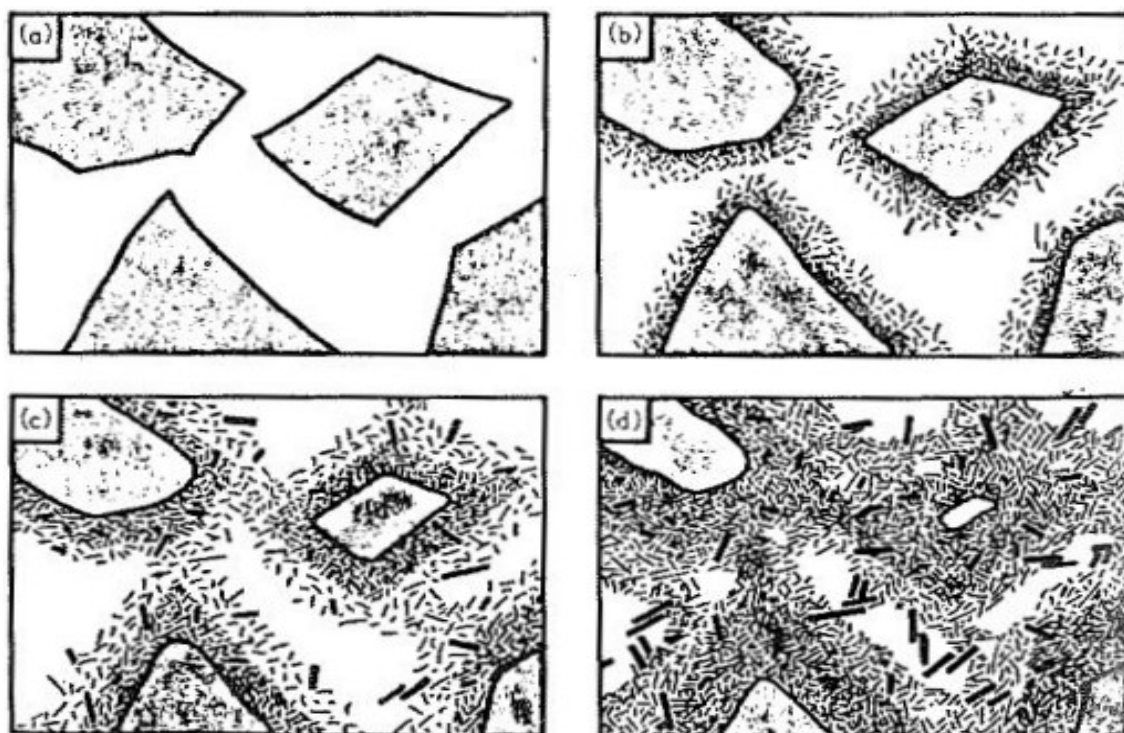
sementin varsin yleisessä sementtilaadussa Plussementissä noin 30% sementtiklinkkeristä on korvattu seosaineilla. Yleisimmät suomessa käytetyt seosaineet ovat kalkkikivi, masuunikuonajauhe, lentotuhka ja silika. Seosaineilla voidaan myös vaikuttaa betonimassan- ja valmiin lopputuotteen ominaisuuksiin. Seosaineita voidaan käyttää esimerkiksi erittäin paksuissa valuissa, kun halutaan pienentää sitoutumisreaktion tuottamaa lämpökuormaa. (Finnsementti, 2017), (Betonitekniikan oppikirja by 201, 2018)

Lisäaineet ovat ainesosia, joita lisätään erittäin pieniä määriä (enintään 50 g / 1 kg sementtiä) betonimassan valmistuksessa. Lisäaineilla voidaan vaikuttaa hyvin monipuolisesti betonimassan ominaisuuksiin (muun muassa notkeus, sitoutumis- ja kovettumisnopeus, vedenerottuminen ja vedenimeytyminen) ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin (muun muassa pakkasenkestävyys ja kutistuminen). Lisäaineet vaikuttavat joko kemiallisesti tai fysikaalisesti. Lisäaineet ovat merkittävässä osassa esimerkiksi korkealujuusbetonien ja pakkasenkestävien betonilaatujen valmistuksessa. Tavoiteltujen ominaisuuksien lisäksi lisäaineilla voi olla merkittäviäkin sivuvaikutuksia, joita ei täysin tunneta. Betonirakentamisen laatu nousi mediassa näkyvästi esille vuonna 2016, kun Suomessa jouduttiin purkamaan joitakin uusia betonirakenteita vakavan lujuuskadon vuoksi. Rakennusteollisuus ry:en teettämän selvitysraportin (Mäkikyrö, 2017) mukaan todetuissa vakavissa lujuuskadoissa merkittävin yksittäinen tekijä oli liiallinen ilmamäärä valmiissa lopputuotteessa. Mäkikyrön mukaan huokostavat lisäaineet voivat kasvattaa ilmamäärän ennen betonin sitoutumista jopa kolminkertaiseksi suunnitellun viiden tilavuus-% sijaan. Poikkeavaa vanhoihin tunnettuihin lisäaineisiin oli ilmamäärän kasvun jatkuminen sekoittamisen jälkeenkin.

2.1.2 Betonin sitoutuminen ja kovettuminen

Betonin sitoutuminen ja kovettuminen tapahtuvat hydrataatioreaktion kautta. Hydrataatioreaktiossa sementin kalsiumsilikaatit ja kalsiumaluminaatit reagoivat kemiallisesti veden kanssa ja muodostavat niin sanotun sementtikiven, joka liimaa runkoainepartikkelit toisiinsa. Hydratoitumisreaktio tapahtuu aluksi nopeasti ja hidastuu, kun reagoimattomien yhdisteiden ja veden määrä vähenee. Reaktio jatkuu niin kauan, että reaktiotuotteet ovat kuluneet loppuun. Reaktiota on havainnollistettu kuvassa 2.1. Hydrataatioreaktio jaetaan kirjallisuudessa (esimerkiksi (Neville, 1973) ja (Betonitekniikka RIL 119, 1979)) kahteen vaiheeseen, betonin sitoutumiseen ja betonin kovettumiseen. Sitoutumisvaiheessa betonimassa nimensä mukaisesti sitoutuu, eli muuttaa olomuotonsa nestemäisestä pastasta kiinteäksi. Sitoutumisvaihe alkaa tavanomaisilla betoneilla noin muutaman tunnin kuluessa betonimassan sekoituksesta. Kovettumisvaiheen ja sitoutumisvaiheen välisen rajapinnan määrittäminen on epätarkkaa, mutta kovettumisvaiheen katsotaan alkaneen yleensä noin 4...6 tunnin kuluttua betonimassan sekoituksesta ja jatkuu hydratoitumisreaktion loppuun saakka. Kovettumisvaiheessa betoni saavuttaa lopullisen lujuutensa.

Kovettumisvaiheen pituus riippuu käytetystä betonilaadusta, mutta yleisimmät betonilaadut ovat saavuttaneet lähes lopullisen lujuutensa noin 90 vuorokauden iässä. (Betoniteknikka RIL 119, 1979)



Kuva 2.1. Periaatekuva (*Betoniteknikka RIL 119, 1979*) sementin sitoutumisen ja kovettumisen eri asteista:

- Reagoimattomia sementtihiukkasia veden ympäröimänä välittömästi veden lisäämisen jälkeen.*
- Tilanne muutaman minuutin kuluttua veden lisäämisestä. Hydrataatiotuotteita on muodostunut rakeiden pinnalle*
- Muutaman tunnin kuluttua veden sekoittamisesta rakeiden ympärille kehittyneet reaktiotuotteet koskettavat toisiinsa ja betonin sitoutuminen on alkanut.*
- Muutaman vuorokauden kuluttua hydrataatio on jo edennyt pitkälle ja betonin lujuuden kehitys ja kovettumisvaihe on alkanut.*

Edellä käsitelty sementin ja veden välinen hydrataatioreaktio on merkittävä erityisesti betonin lujuuden kehityksen kannalta. Tämän tutkimuksen näkökulmasta oleellisempaa on kuitenkin tarkastella hydrataatioreaktiota betonin kosteusteknisen toiminnan kannalta, mitä käsitellään luvussa 2.2.1 *Kosteuden sitoutuminen betoniin*.

2.2 Betonilaatan kosteustekninen toiminta

Betonirakenteiden kuivumista tarkasteltaessa on tarpeellista ymmärtää betonin kosteuslähteet sekä keskeisimmät betonin kosteus- ja lämpötekniistä toimintaa koskevat rakennusfysikaaliset ilmiöt. Kosteutta voi esiintyä betonin huokosrakenteessa, betonin pinnoilla tai ympärillä olevassa aineessa kolmessa eri olomuodossa kaasuna (vesihöyry),

nesteenä (vesi) tai kiinteänä (jää). Betonirakenteissa on lisäksi kemiallisesti sementtikiiven hydrataatioreaktiossa sitoutuneita vesimolekyyliä, joilla ei kuitenkaan ole vaikutusta betonin kosteuspitoisuuteen.

Kosteus voi siirtyä materiaalin sisällä tai materiaalin ja ympäröivän aineen välillä diffuusion, konvektion, kapillaarisen imun, tuulenpaineen tai painovoiman vaikutuksesta (Hagentoft 2001). Useimmiten betonirakenteissa kosteuden siirtymistä tapahtuu samanaikaisesti useammalla edellä mainitulla tavalla.

2.2.1 Kosteuden sitoutuminen betoniin

Betonilattian kosteuslähteet

Tuoreen betonimassan sisältämä kosteus on peräisin pääosin betonimassan valmistukseen käytetystä vedestä. Tavanomaiseen lattiabetonimassaan sekoitetaan seossuhteista riippuen noin 150...200 l/m³ vettä. Lisäksi betonimassan valmistukseen käytetyn runkoaineksen kosteuspitoisuus sekä sekoitus ja kuljetuskaluston mahdolliset pesuvesien jäämät voivat vaikuttaa jonkin verran betonimassan kokonaisvesimäärään. Runkoaineksen kosteuspitoisuus pyritään huomioimaan betoniasemalla vähentämällä kompensoimalla seosveden määrää runkoaineksen kosteuspitoisuuden mukaan. (Betonitekniikan oppikirja 2018).

Usein kantavan betonirakenteen päälle valetaan tai levitetään tasoitekerros ennen lopullista lattiapäällystettä tai -pinnoitetta. Osa tasoitteen sisältämästä kosteudesta imeytyy betoniin ja osa haihtuu ympäröivään ilmaan. Myös päällystemateriaalien kiinnitysliimojen sisältämä kosteus tuo betonirakenteeseen kosteuslisää, joka tulee huomioida arvioitaessa rakenteen päällystettävyyttä ja päällysteeseen kohdistuvaa kosteusrasitusta. (Merikallio 2002)

Edellä lueteltujen tarkoituksellisesti lisätyn tai rakennusmateriaalien mukana kulkeutuvan kosteuden lisäksi betonilattiarakenteet altistuvat rakentamisvaiheen aikana usein tahattomasti vesi- tai lumisateille sekä muille vesivahingoille. Usein betoniholvit toimivat alempien kerrosten sääsuojaena ennen lopullisen vesikatteen asentamista ja altistuvat vuodenajasta riippuen varsin voimakkaallekin kosteusrasitukselle. On varsin yleistä, että ikkunoiden suojapellitykset tai vesikaton läpivientien yksityiskohdat viimeistellään vasta, kun rakennustyömaa on jo varsin pitkällä. Paikallisetkin vesivuodot voivat aiheuttaa merkittävää kosteusrasitusta jo kuivatetulle betonirakenteelle. Rakentamisaikaista paikallista kosteusrasitusta voivat aiheuttaa myös esimerkiksi laastinsekoituspaikkana ja työvälineiden pesupaikkana toimivat tila, jossa voidaan käyttää runsaasti vettä.

Betoni on ominaisuuksiltaan sekä hygroskooppinen, että kapillaarinen materiaali. Hygroskooppisuus tarkoittaa, että betoni pystyy sitomaan itseensä ympäröivästä ilmasta vesihöyrymuodossa olevaa kosteutta ja luovuttamaan sitä takaisin. Toisin sanoen kostea ym-

päröivä ilma voi olla myös betonin kosteuslähde sekä rakentamisvaiheen, että käytön aikana. Betonin huokosilman suhteellinen kosteuspitoisuus vaihtelee ympäröivän ilman suhteellisen kosteuspitoisuuden mukaan ja pitkällä aikavälillä tasaantuu ympäröivän ilman kanssa samaan suhteelliseen kosteuteen. Hygroskooppisen kosteudensiirtymisilmiön kautta tapahtuvasta betonin kosteuden noususta käytetään määritelmää kostuminen ja vastaavasti hygroskooppisesti tapahtuvasta kosteuden poistumisesta määritelmää kuivuminen.

Kapillaaristen ominaisuuksien vuoksi betoni imee huokosrakenteeseensa nestemäisessä muodossa olevaa kosteutta ollessaan kosketuksissa vapaaseen veteen tai märkään materiaaliin. Kapillaarisen kosteudensiirtoilmiön seurauksena tapahtuvasta betonin kosteuden noususta käytetään määritelmää kastuminen.

Tämä tutkimus keskittyy lähinnä betonirakenteen rakentamisaikaiseen kosteuskäyttäytymiseen, joten työssä ei käsitellä yksityiskohtaisesti käytön aikaisia kosteuslähteitä. Merkittävimmät käytön aikana betonilattiaan kohdistuvat kosteusrasitukset ovat vesivahingot tai maaperästä kapillaarisesti tai diffuusiolla nouseva kosteus.

Kosteuden sitoutuminen tuoreeseen betoniin

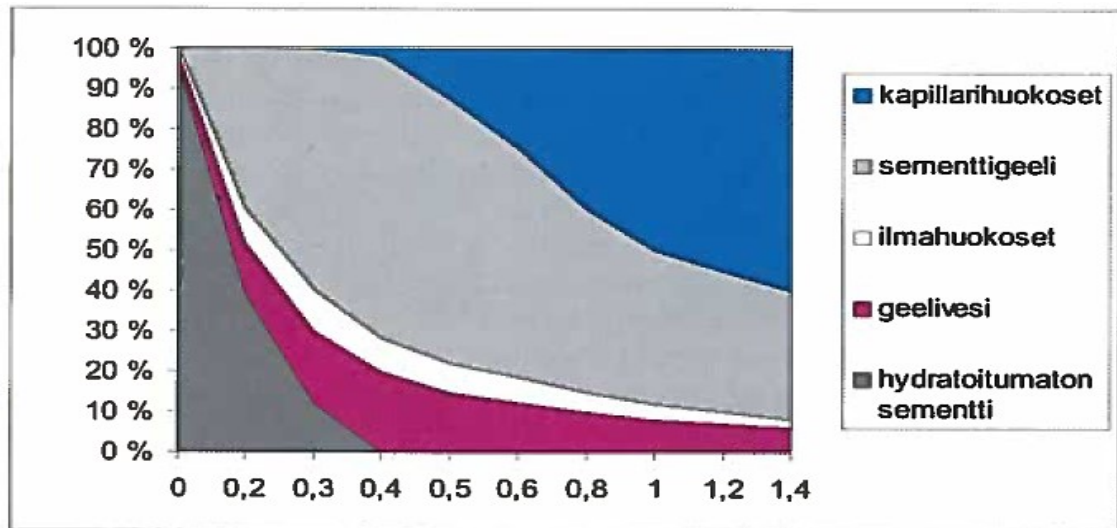
Kuten edellä on todettu, vesi on yksi keskeisistä betonimassan valmistuksen raaka-aineista. Osa vedestä sitoutuu betoniin kemiallisesti ja loput sitoutuvat betonin huokosrakenteeseen fysikaalisesti niin kutsutuksi rakennekosteudeksi. Kemiallisesti betoniin sitoutunut vesi on osa sementtikiven molekyyli-rakennetta ja sen määrä pysyy hydrataatio-reaktion loputtua vakiona riippumatta betonin kosteuspitoisuudesta (Merikallio 2002).

Kemiallisesti sitoutuvan veden määrä täydellisesti hydratoituneessa betonissa (hydratoitumisaste $\alpha = 1$) on noin 25 % betonin massasta. Käytännön olosuhteissa tavanomaisilla betoneilla hydratoitumisasteen α on todettu jäävän välille 0,7...0,8. Kemiallisesti betoniin sitoutuvan veden määrä W_n voidaan siis määrittää hydrataatioasteen α ja sementin määrän C perusteella kaavalla

$$W_n = 0,25 \times \alpha \times C \quad [\text{kaava 1}]$$

Veden ja sementin välisen hydrataatio-reaktion eteneminen vaatii kuitenkin suurempaa kosteuden läsnäoloa kuin reaktio pystyy sitomaan. Eri lähteiden ((Neville, 1973), (Betong handbok, 1997) ja (Betoniteknikan oppikirja by 201, 2018)) mukaan sementin hydratoituminen edellyttää, että veden määrä on vähintään 40 % sementin massasta. Kovettuneen betonin teknisten ominaisuuksien kannalta vesi-sideainesuhdetta 0,4 pidetäänkin ideaalisena. Tätä suuremmilla vesipitoisuuksilla betoniin alkaa muodostua betonin teknisiä ominaisuuksia heikentäviä kapillaarihuokosia ja tätä pienemmillä vesi-sideainesuhteilla osa sementistä jää hydratoitumatta (Neville, 1973). Vesi-sideainesuhteella 0,4 betonimassa on kuitenkin varsin jäykkää ja yleensä betonin paremman muokattavuuden vuoksi tavanomaisen lattiabetonin vesi-sideainesuhteena käytetään arvoa 0,6...0,8, mikä

on kompromissi betonimassan muokattavuuden ja lopputuotteen teknisten ominaisuuksien osalta. Vesisementtisuhteen vaikutusta betonin sementtikiven rakenteeseen on havainnollistettu alla olevassa kuvassa 2.1. Mikäli rakenteelle on erityisiä lujuus- tai säilyvyysvaatimuksia, voidaan betonimassan muokattavuutta parantaa lisäaineilla, jolloin vesi-sementtisuhte saadaan lähemmäksi ideaalia 0,4 (Betoniteknikan oppikirja 2018).



Kuva 2.2. Vesi-sideainesuhteen periaatteellinen vaikutus betonin sementtikiven rakenteeseen. Vaaka-akselilla on kuvattu betonin vesi-sementtisuhte ja pystyakselilla sementtikiven eri osien tilavuusosuus sementtikivestä. Kuvan lähde (Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen, 2007).

Tavanomaisen lattiabetonin valmistukseen voidaan käyttää esimerkiksi 200 kg/m^3 vettä ja 250 kg/m^3 sementtiä, jolloin vesi-sementtisuhteeksi muodostuu 0,8. Hydrataatioasteella 0,8 kemiallisesti sitoutuvan veden määräksi muodostuu 50 kg/m^3 kaavan 1 perusteella. Hydratoituneeseen betoniin jää siten noin 150 kg fysikaalisesti betonin huokosrakenteeseen sitoutunutta niin kutsuttua rakennekosteutta tai haihtumiskykyistä kosteutta, josta osa poistuu betonin kuivumis- ja käyttövaiheen aikana. Fysikaalisesti sitoutunut kosteus esiintyy betonissa useammassa eri muodoissa:

- tavanomaisissa olosuhteissa suurin osa vesimolekyyleistä on adsorboitunut betonin huokosten sisäpinnoille kerroksittain ja kapillaarikondenssin vaikutuksesta
- osa kosteudesta on sitoutunut vesihöyrymuodossa betonin huokosilmaan,
- lisäksi betonin sementtigelikiteiden väliin jää vapaata vesitäytteistä tilaa, jonka sisältämää vettä kutsutaan geelivedeksi.

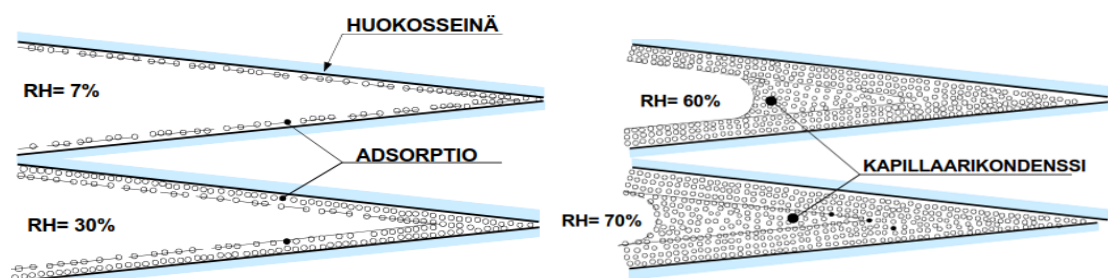
Lähdekirjallisuudesta ei ollut löydettävissä selkeitä taulukoita tai kuvaajia, joista ilmenisi suuruusluokkia kosteuden jakaantumisesta edellä mainittuihin esiintymismuotoihin. Betonin kuivumisilmiön ymmärtämisen helpottamiseksi seuraavissa kappaleissa pyritään hahmottamaan suuruusluokkia huokosrakenteeseen fysikaalisesti sitoutuneen kosteuden jakaantumisesta stationääritilassa lähdekirjallisuuden avulla.

Lähtökohtana pidetään lattiabetonia, jonka sementtikiven huokosrakenne noudattaa kuvassa 2.2 esitettyä jakaumaa vaaka-akselin arvolla 0,8. Betonimassan alkuperäinen vesimäärä on ollut 200 kg/m^3 , josta kemiallisen sitoutumisen jälkeen on jäljellä fysikaalisesti sitoutunutta kosteutta 150 kg/m^3 . Valitaan stationääritilaksi 20°C ja $90\% \text{ RH}$. Lähdekirjallisuudessa (Merikallio, 2002) esitetystä esimerkissä edellä mainitun stationääritilan saavutettuaan lattiabetonista on haihtunut vettä 50 kg/m^3 , jolloin fysikaalisesti sitoutunutta kosteutta on jäljellä vielä 100 kg/m^3 .

Geeliveden määrä riippuu pääasiassa betonin huokosrakenteesta. Geelihuokokset ovat varsin pieniä ($1\ldots 5 \text{ nm}$) ja veden liikkeet huokosissa ovat erittäin hitaita (Betoniteknikan oppikirja by 201, 2018). Geelivesi ei poistu betonista normaaliolosuhteissa, vaan vaatii poistukseen erittäin alhaista suhteellista kosteutta (Merikallio, 2009). Geeliveden määrää voidaan arvioida, kun tunnetaan betonin huokosrakenne ja geelihuokosten määrä. Kuvassa 2.1 geeliveden määrä on noin 9% sementtikiven tilavuudesta. Olettaen sementtikiven tilavuusosuuden olevan 35% betonin tilavuudesta, saadaan geeliveden määrän suuruusluokaksi noin 30 kg/m^3 .

Huokosilmaan sitoutuneen kosteuden määrä riippuu pääasiassa betonin huokosrakenteesta ja suhteellisesta kosteuspitoisuudesta (Merikallio, 2009). Rakenteen lämpötilan noston on havaittu nostavan huokostilan suhteellista kosteutta. Rakenteen kosteussisällön ollessa vakio suhteellisen kosteuden nousu tarkoittaa sitä, että osa huokosseinämien vesimolekyyleistä irtaantuu ja sitoutuu vesihöyrymuodossa huokosilmaan (Nilsson, 1979). Kuvassa 2.2 ilma- ja kapillaarihuokosten yhteistilavuus on noin 45% sementtikiven kokonaistilavuudesta. Olettaen sementtikiven tilavuusosuuden olevan 35% betonin tilavuudesta, saadaan huokosilmaan sitoutuneen kosteuden määräksi valitussa stationääritilassa alle 3 g/m^3 . Huokosilmaan sitoutuneen kosteuden määrä on siis vain murto osa betonin koko kosteussisällöstä.

Adsorboituneen ja kapillaarikondenssilla sitoutuneiden vesimolekyylien määrään vaikuttaa betonin huokosrakenne ja betonin huokosilman suhteellinen kosteuspitoisuus (Merikallio, 2009). Kosteuden sitoutumisilmiötä huokosten pinnoille ja suhteellisen kosteuden vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Periaatteellinen havainnekuva huokosten pinnoille sitoutuneista vesimolekyyleistä (Vinha, 2011).

Kuten kuvasta 2.3 nähdään adsorboituneen kosteuden sekä kapillaarisesti sitoutuneen kosteuden määrä lisääntyy voimakkaasti suhteellisen kosteuden noustessa ja lämpötilan pysyessä vakiona. Geeliveden määrän ollessa noin 30 kg/m^3 ja huokosilmaan sitoutuneen kosteuden määrä vain noin $3 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ jää adsorboituneen ja kapillaarisesti sitoutuneen kosteuden määräksi noin 70 kg/m^3 .

Betonissa olevan kosteuden jakaantuminen edellä kuvattuihin kemialliseen ja eri fysikaalisiin ilmenemismuotoihin muuttuu jatkuvasti niin kauan, kunnes betonin hydrataatioreaktio on edennyt täysin loppuun ja rakenne on tasaantunut ympäröiviin kosteusolosuhteisiin. Muutokset ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden mukaan tapahtuvat kuitenkin erittäin hitaasti vuosien kuluessa.

Kovettuneen betonin kostuminen ja kastuminen

Kovettunut betoni on huokoinen materiaali, joka pystyy imemään kosteutta itseensä sekä hygroskooppisesti että kapillaarisesti. Betonirakennetta ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuuden noustessa alkaa betonin huokosrakenteeseen siirtyä diffuusiolla vesihöyrymuodossa olevaa kosteutta ympäröivästä ilmasta. Hygroskooppisen kosteudensiirtymisilmiön vaikutuksesta tapahtuva kosteuden nousu määritellään kostumiseksi. (Merikallio et. all. 2007)

Betonin ollessa kosketuksissa veteen tai märkään materiaaliin alkaa betoni imeä huokosrakenteensa sisään nestemäisessä muodossa olevaa vettä. Kapillaarisen kosteudensiirtymisilmiön kautta tapahtuva kosteuden nousu betonissa määritellään betonin kastumiseksi. (Merikallio et. all. 2007)

Kapillaari-ilmiö vaatii yhtenäisen avoimen kapillaarihuokosverkoston, jotta veden kulkeutuminen on mahdollista. Kapillaarihuokokset muodostuvat betoniin sitoutumisvaiheessa, kun hydrataatioreaktioon osallistumaton ”ylimääräinen vesi” jää betonin sisään. Kapillaarihuokosia on siten sitä enemmän mitä enemmän betonissa on sementin kanssa reagoimatonta vettä. Hydrataatioreaktion edetessä kapillaarihuokosten määrä vähenee. On todettu, että vesi-sementtisuhteen ollessa enintään 0,4 täydellisesti hydratoituneeseen betoniin ei jää ollenkaan kapillaarihuokosia. Vesisementtisuhteella 0,6 kapillaarihuokosverkosto sulkeutuu hydrataation edetessä siten, että kapillaarihuokosverkostosta tulee lopulta epäjatkuva eikä kapillaarinen kosteuden siirtyminen ole mahdollista. Useimmissa rakennebetoneissa vesisementtisuhte on kuitenkin niin suuri, että betoniin jää avoin kapillaarisen kosteuden siirtymisen mahdollistava kapillaarihuokosverkosto. (Merikallio et. all. 2007)

Tuoreen betonin kapillaarihuokokset ovat vielä vesitäytteisiä eikä huokosrakenteeseen juurikaan mahdu lisää vettä. Betonin kuivuessa vesi poistuu kapillaarihuokosverkostosta ja huokosrakenne pystyy taas imemään suurempia määriä kapillaarista kosteutta itseensä. Tästä syystä altistuminen vesivuodolle on sitä haitallisempia mitä myöhäisemmässä vai-

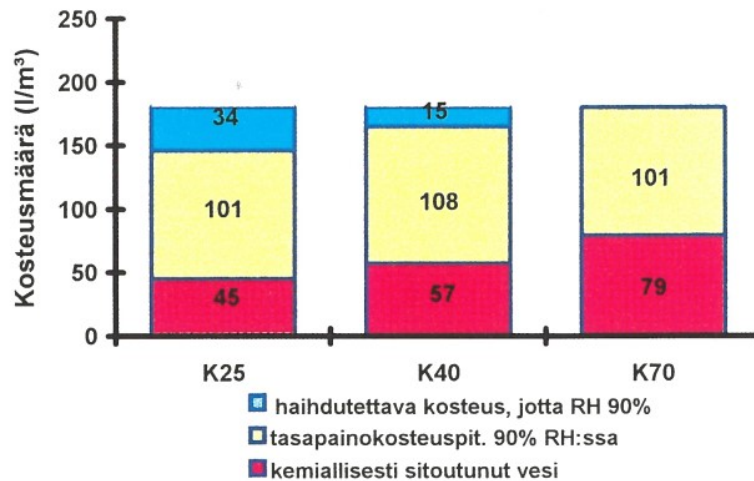
heessa se tapahtuu. Toisaalta kapillaarihuokosverkoston ainakin osittainen sulkeutuminen hydrataatioreaktion edetessä hidastaa kosteuden siirtymistä kapillaarisesti. Tämä johtaa siihen, että vanhan betonin kuivuminen on usein hitaampaa kuin tuoreen betonin kuivuminen. (Merikallio et. all. 2007)

2.2.2 Betonin sitoutumis- ja haihtumiskuivuminen

Betonimassan sisältämän kosteuden ”poistuminen” betonista tapahtuu kahden toisistaan erillisen kuivumisilmiön kautta: sitoutumiskuivumisen- ja haihtumiskuivumisen. Sitoutumiskuivumisella tarkoitetaan betonissa olevan kosteuden sitoutumista kemiallisesti betonin molekyyli-rakenteeseen. Haihtumiskuivumisella taas tarkoitetaan kosteuden poistumista betonin huokosrakenteesta rakennusfysikaalisten ilmiöiden kautta siten, että kosteus siirtyy ensin kapillaarisesti ja/tai diffuusiolla rakenteen pintaan ja haihtuu siitä ympäröivään ilmaan. Valtaosa sitoutumiskuivumisesta tapahtuu muutaman ensimmäisen välisen jälkeisen päivän aikana, kun taas haihtumiskuivuminen alkaa käytännössä vasta betonilattian 1...2 viikon jälkihoitojakson päätyttyä. Haihtumiskuivumista tapahtuu niin kauan, kunnes betoni saavuttaa tasapainokosteuden ympäristön kanssa tai kuivuminen muutoin estetään esimerkiksi vesihöyrytiiviillä lattianpäällysteellä. Tasapainokosteuteen kuivumiseen kuluva aika riippuu useista tekijöistä, mutta kestää lähes kaikissa tapauksissa useita vuosia. Betonia ei kuitenkaan tarvitse yleensä kuivattaa tasapainokosteuteen asti eikä koko rakenteen syvyydeltä vaan useimmille päällystemateriaaleille riittää, että alustabetonin suhteellinen kosteuspitoisuus pysyy alle 80-90 % päällystemateriaalin ja betonin rajapinnassa (Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet, 2007).

Sitoutumiskuivuminen

Kuten edellä on todettu, vesi-sementtisuhteella voidaan vaikuttaa merkittävästi kemiallisesti sitoutuvan kosteuden määrään. Tavanomaisen lattiabetonin tuoreen betonimassan kosteussisältö on noin 200 kg/m^3 ja suhteellinen kosteuspitoisuus 100 %. Sitoutumiskuivumisen seurauksena esimerkkibetonin kosteussisältö on jälkihoitojakson jälkeen noin 150 kg/m^3 ja betonin suhteellinen kosteus on pudonnut tavanomaisilla rakennebetoneilla noin 98 prosenttiin. Betonin huokosrakenne on vielä pääosin vesitäytteistä lukuun ottamatta mahdollisia suojahuokosia. Nopeasti päällystettävillä erikoisbetoneilla, joissa on alhainen vesisementtisuhte, sitoutumiskuivumisen osuus saadaan suuremmaksi kuin tavanomaisilla betoneilla. Betonin suhteellinen kosteus saadaan laskemaan jopa alle 90 % pelkän sitoutumiskuivumisen seurauksena. Tästä syystä nopeasti päällystettäviä betonilattaita voidaan kutsua ”itsestään kuivuviksi” betoneiksi eikä haihtumiskuivumista välttämättä tarvita ollenkaan (Niemi et al. 2007). Betonin lujuusluokan ja vesisementtisuhteen vaikutusta sitoutumiskuivumiseen on havainnollistettu seuraavassa kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. Kosteuden jakautuminen teoreettisesti 90 % suhteellisessa kosteudessa eri lujuusluokan betoneissa, kun alkuperäinen vesimäärä on 180 l/m^3 . Betonien hydrataatioasteet ovat välillä 0,7-0,8. Vesisementtisuhteet ovat $K25 \approx 0,7$, $K40 \approx 0,5$ ja $K70 \approx 0,4$. kuvan lähde (Niemi et al. 2007)

Haihtumiskuivuminen

Betonilattian haihtumiskuivuminen alkaa käytännössä jälkihoitojakson jälkeen noin 1-2 viikkoa valusta. Haihtumiskuivuminen jatkuu niin kauan, kunnes rakenne on saavuttanut hygroskooppisen tasapainokosteuden ympäröivän ilman kanssa. Haihtumiskuivuminen voidaan jakaa lähteistä riippuen 2 tai 3 eri vaiheeseen. Kolmivaiheisen jaottelun (Vinha, 2011) mukaan vaiheet ovat seuraavat:

1. Vaihe

Haihtumiskuivumisen alkuvaiheessa betonin huokosverkoston kosteuspitoisuus on koko rakenteen paksuudelta kapillaarisella alueella eli $> 97 \%$. Betonin kapillaarihuokosverkosto siirtää kosteutta kapillaarisen imun ja diffuusion yhteisvaikutuksella rakenteen pintaan, josta kosteus haihtuu ympäröivään ilmaan. 1. vaiheessa kosteusvirta betonista poispäin on suuri ja kuivumisnopeuden määrittää kosteuden haihtumisnopeus betonin pinnasta. Rakenteen pystysuuntainen kosteuskakauma on tasainen. Vaiheen 1 ajallinen kesto valun ja jälkihoitojakson jälkeen riippuu lähinnä kuivatusolosuhteista sekä käytetystä betonilaadusta, mutta kestää tavanomaisilla rakennebetoneilla tyypillisesti muutamasta tunnista muutamaan päivään.

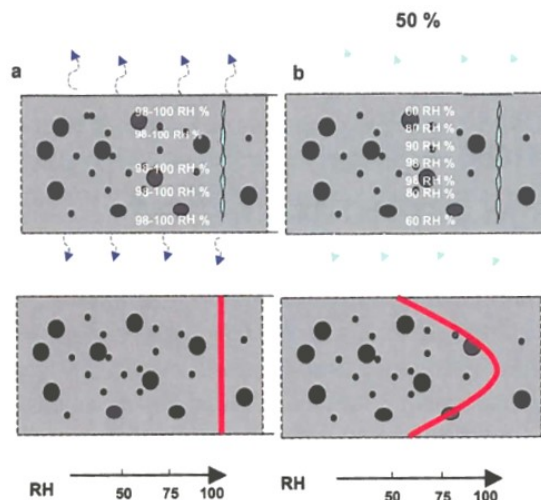
2. Vaihe

Rakenteen pintaosien kuivuminen alle kapillaarisen alueen estää kosteuden kapillaarisen siirtymisen kohti rakenteen pintaa. Tästä alkaa haihtumiskuivumisen toinen vaihe, jonka aikana kosteus siirtyy rakenteen sisältä ensin kapillaarisesti kapillaarisen alueen rajalle ja siitä diffuusiolla pintaa kohti. Kuivumisen edetessä kapillaarisen alueen raja siirtyy yhä syvemmälle rakenteeseen ja etäisyys, jonka kosteus joutuu siirtymään diffuusiolla kasvaa. Kosteuden siirtymi-

nen diffuusiolla on huomattavasti hitaampaa kuin kapillaarinen kosteuden siirtyminen, mistä syystä kuivuminen hidastuu. Lisäksi veden ja sementin hydrataatioreaktion edetessä betonin huokosverkosto muuttuu osittain sementtikiveksi ja betonin vesihöyrynläpäisevyys heikkenee hidastaen kosteuden siirtymistä entisestään. Betonin kosteuspitoisuus ja suhteellinen kosteus alenevat tässä vaiheessa nopeammin haihduttavan pinnan lähellä kuin syvemmällä rakenteessa. Syntyy selkeä kosteusjakauma siten, että pinnassa on kuivempaa kuin syvemmällä rakenteessa.

3. Vaihe

Rakenteen haihduttavan pinnan pintaosien saavuttaessa hygroskooppisen tasapainokosteuden ympäröivän ilman kanssa pintaosien kosteuspitoisuus ei enää laske. Tästä alkaa kuivumisen 3. vaihe, jonka aikana kosteutta poistuu ainoastaan syvemmältä rakenteesta. Rakenteen sisäosatkin voivat olla jo hygroskooppisella alueella eli $< 97\%$, jolloin sisäosien kosteus siirtyy haihduttavalle pinnalle ainoastaan diffuusion avulla. Kuivuminen jatkuu niin kauan, kunnes rakenne on saavuttanut hygroskooppisen tasapainokosteuden rakenteen koko syvyydeltä ja rakenteen kosteusjakauma on tasaantunut. Kuivumisen 3. vaihe kestää yleensä vuosia.



Kuva 2.5. Tavanomaisesti rakennebetonista tehdyn molempiin suuntiin kuivuvan rakenteen kosteusjakauman muodostuminen kuivumisvaiheiden aikana sekä päällystämisen jälkeen. Kuvassa a vastaa 1. kuivumisvaihetta, b vastaa 2. ja 3. kuivumisvaiheen rajapintaa (Merikallio et. al. 2007).

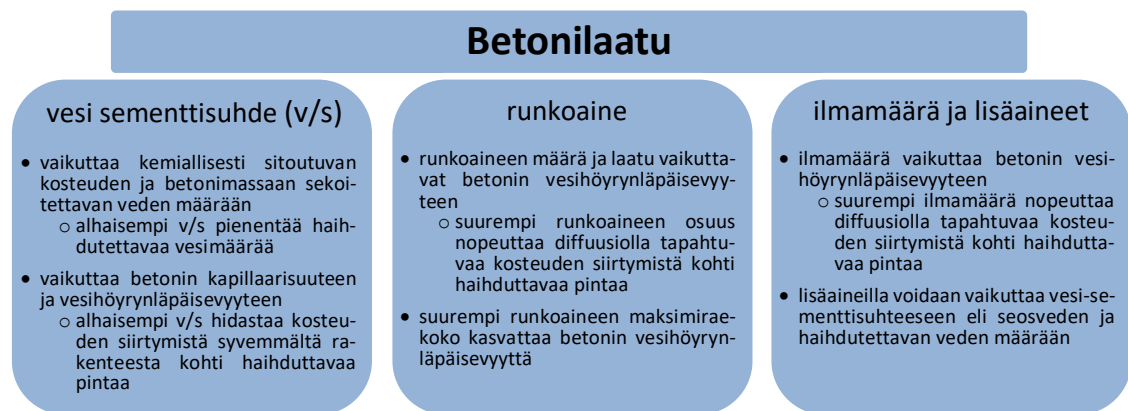
2.2.3 Betonilattian kuivumiseen vaikuttavat tekijät

Aika, joka betonirakenteella kuluu halutun kosteusraja-arvon saavuttamiseen, riippuu kolmesta päätekijästä, rakennetyypistä, betonilaadusta sekä kuivumisolosuhteista. Betonilaadun ja rakennetyypin määrittäminen tehdään tyypillisesti jo suunnitteluvaiheessa, joten suurin osa betonirakenteen kuivatusaikaan vaikuttavista tekijöistä on lukittu jo ennen valua. Suotuisten kuivumisolosuhteiden ylläpitämisellä voidaan kuitenkin vaikuttaa vielä

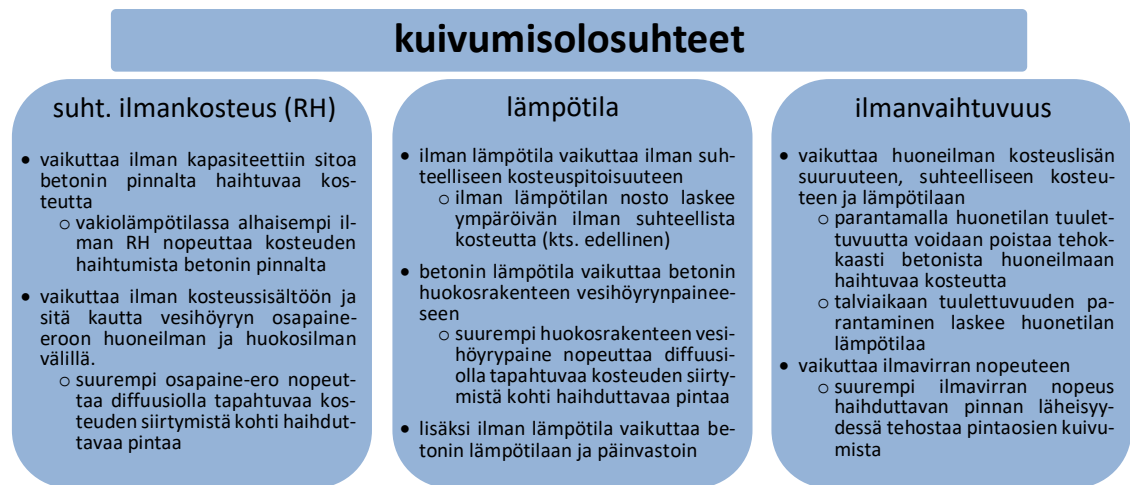
rakennusaikana merkittävästi betonirakenteen kuivumisnopeuteen. Kuvien 2.6, 2.7 ja 2.8 kaavioihin on koottu eri lähteistä (BY 201, 2018, Leivo et al. 2005, Merikallio, 2009, Merikallio et al. 2007, Neville, 1973) merkittävimpien betonin kuivumiseen vaikuttavien tekijöiden vaikutusmekanismit betonin kuivumisaikaan.



Kuva 2.6. Rakennetyypin vaikutusmekanismit betonin kuivumisaikaan



Kuva 2.7. Betonilaadun vaikutusmekanismit betonin kuivumisaikaan



Kuva 2.8. Kuivumisolosuhteiden vaikutusmekanismit betonin kuivumisaikaan

2.3 Lattianpäällyste- ja pinnoitevauriot

Betoni on hyvin kosteutta kestävä materiaali. Betoni ei lahoa eikä menetä lujuuttaan jatkuvassakaan kosteusrasituksessa. Päinvastoin, erityisesti hydratoitumisvaiheessa korkea kosteuspitoisuus edesauttaa betonin lujuuden muodostumisessa (Merikallio;Niemi;& Komonen, 2007). Paljon alkalista kosteutta ja vähän ravinteita sisältävänä materiaalina betoni on huono kasvualusta mikrobikasvulle. Puhtaalla betonipinnalla tavataan harvoin mikrobikasvua. Suotuisissa olosuhteissa esimerkiksi betonipinnalle kerääntynyt pöly kuitenkin saattaa riittää käynnistämään mikrobikasvun (Ympäristöministeriö, 2015). Lähteen (Viitanen, ym., 2010) mukaan mikrobikasvu on saatu käynnistymään laboratorio olosuhteissa myös ilman lisäravinteita puhtaalla betonialustalla mikrobisuspension avulla.

Betonilattian kosteus voi muodostua ongelmaksi, kun kosteaa betonirakennetta vasten asennetaan huonosti kosteutta kestäviä materiaaleja kuten puuta, tasoitetta tai lattiapäällysteiden kiinnitysliimoja (Järnström, 2005). Yleisimmät lattiapäällystevauriot uudehkoissa rakennuksissa koskevat muovipohjaisten lattiapäällysteiden kiinnitysliimojen hajoamista. Tästä syystä tässä työssä käsitellään tarkemmin vain muovipohjaisten lattianpäällysteiden vaurioita. Nykyisin muovipohjaiset lattiapäällysteet kiinnitetään betonialustaan vesiliukoisilla kiinnitysliimoilla. Olemassa olevan kansallisen ohjeistuksen mukaan (Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet, 2007) kiinnitysliimojen kriittisenä suhteellisen kosteuden raja-arvona pidetään 85 % RH. Nykyisen tutkimustiedon mukaan liimojen kemiallinen hajoaminen voi alkaa, mikäli suhteellinen kosteus liimatilassa nousee liiman kovettumisen jälkeen pitkäksi aikaa yli tämän arvon. Liian korkea suhteellinen kosteus ja betonin korkea alkalisuus yhdessä voivat saada aikaan liimojen sideaineen ja päällystemateriaalin kemiallisia hajoamisreaktioita. Betonin alkalisuus hidastaa mikrobikasvun syntymistä. Mikrobikasvua esiintyykin vain pitkäaikaisen kosteusrasituksen seurauksena (Merikallio, 2007).

Muovipohjaisten lattianpäällystemateriaalien kosteusvauriot voivat ilmetä monin eri tavoin, kuten päällysteen irtoamisena, kupruiluna tai värimuunnoksina. Edelle esitettyjen fyysisten muutosten lisäksi hajoamisreaktion seurauksena syntyy VOC-yhdisteitä (haihtuvat orgaaniset yhdisteet), joiden on todettu olevan terveydelle haitallisia. Lattianpäällysteestä haihtuvia VOC-yhdisteitä voidaan mitata tilan sisäilmasta (sisäilman VOC-mittaus), materiaalin pinnasta (FLEC-mittaus) tai materiaalista irrotetusta näytepalasta (BULK-mittaus). (Järnström, 2005)

On myös viitteitä, että jotkin pintarakenteet eivät välttämättä kestä yleistä kriittistä kosteusraja-arvoa 85 % RH. Materiaalivalmistajat tai maahantuoja ei kuitenkaan ole antaneet materiaalienkohtaisia raja-arvoja, joita päällystämisen ohjeet julkaisussa on edellytetty erityisesti niille materiaaleille, jotka eivät kestä yleistä kriittistä kosteusraja-arvoa. Raja-arvoa alhaisemmissa kosteuspitoisuuksissa esiin tulleiden yksittäisten vauriotapausten vuoksi on jopa esitetty, että yleistä raja-arvoa erityisesti muovipäällysteiden osalta tulisi laskea. On myös viitteitä, että sopimattomat tuoteyhdistelmät ja väärät tuotevalinnat aiheuttavat materiaalien keskinäisiä kemiallisia reaktioita ja haitallisia päästöjä, myös alhaisissa kosteuspitoisuuksissa (Rakennusteollisuus RT, 2017). Aihepiiriin liittyen vuoden 2017 alusta on käynnistetty tutkimushanke Tampereen teknillisellä yliopistolla. Tutkimuksen tavoitteena on hankkia tietoa eri lattianpäällystemateriaalien kosteusteknisistä ja kemiallisista ominaisuuksista, selvittää muovipohjaisten lattianpäällystevaurioiden syntymiseen vaikuttavia tekijöitä sekä määrittää materiaaliyhdistelmiä, jotka ovat keskenään yhteensopivia.

3 KOSTEUDENHALLINTA

Betonilattioiden kosteudenhallinta on viime vuosikymmeninä noussut mediassa esille erityisesti julkisissa rakennushankkeissa ilmenneiden muovimattopäällysteisten lattioiden vaurioiden vuoksi. Ongelmille on esitetty syyksi muuttuneita lattianpäällyste- ja tasoitemateriaaleja ja tiukentuneita aikatauluvaatimuksia. Yhtenä syynä syntyneisiin vaurioihin ja pidentyneisiin kuivumisaikoihin on esitetty myös rakenteiden pidentyneitä jännevälejä ja sitä kautta kasvaneita rakennepaksuuksia (Miettunen, K. & Wirtanen, 2018). Useilla rakennustyömailla betonilattian kuivuminen päällystyskuivaksi onkin työmaan etenemisen ja käyttöönoton kannalta tahdistava työvaihe. Tämä piirre on lisännyt tarvetta erilaisille kuivatusratkaisuille ja toisaalta kiinnostusta betonilaadun valinnalle myös betonilaadun kuivumisominaisuuksien näkökulmasta. Markkinoilla on ollut jo kymmeniä vuosia nopeasti päällystettäviä betonilaatuja, jotka eivät kuitenkaan ole syystä tai toisesta saavuttaneet suurta suosiota.

Usein betonirakenteiden kosteudenhallinta painottuu työmaa-aikaisiin kuivatustekniikoihin. Työmaa-aikaiset kuivatustekniikat voidaan jakaa karkeasti kolmen tyyppisiin ratkaisuihin:

- Olosuhteisiin vaikuttavat kuivatustekniikat, kuten tilojen lämmitys ja osastointi tai ilmankuivaimet.
- Kuivatettavan rakenteen lämmittäminen rakenteen ulkopuolelta esimerkiksi säteilylämmittimellä tai levykuivaimilla.
- Kuivatettavan rakenteen lämmittäminen valuun asennetuilla järjestelmillä esimerkiksi lämmityslangoilla tai käytönaikaisella lattialämmitysjärjestelmällä.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltu kuivatusjärjestelmä on yksi erikoisratkaisu, jolla pyritään lyhentämään betonirakenteen kuivumisaikoja ja toisaalta tuomaan lisävarmuutta lattiapäällystevaurioiden syntymistä vastaan. Tarkasteltava kuivatusjärjestelmä ei suoraan kategorisoidu mihinkään yllä luetelluista kuivatustekniikoista. Järjestelmän toimintaperiaate on kuvattu yksityiskohtaisesti luvussa 3.3 tarkasteltava kuivatusjärjestelmä.

3.1 Lainsäädäntö

Rakennushankkeen kosteudenhallintaan liittyen maankäyttö- ja rakennuslain (Maankäyttö- ja rakennuslaki 1999/132, s. 117 c §) mukaan rakennushankkeeseen ryhtyvän vastuulla on huolehtia, ettei rakennuksesta saa aiheutua terveyden vaarantumista esimerkiksi rakennuksen osien tai rakenteiden kosteuden vuoksi.

Maankäyttö- ja rakennuslain alaisten tarkempien säännösten osalta lainsäädäntö on murrostilassa. Tarkemmat säännökset ja määräykset on aiemmin annettu Ympäristöministeriön ylläpitämässä Suomen rakentamismääräyskokoelmassa. Maankäyttö- ja rakennuslain muutoksen 958/2012 siirtymäsäännöksen mukaan rakentamismääräyskokoelman osia ei kuitenkaan voi enää soveltaa 31.12.2017 jälkeen vaan tarkemmat säädökset annetaan vuoden 2018 alusta lähtien ympäristöministeriön asetuksilla. Tässä tutkimuksissa mukana olleilla työmailla sovellettiin vielä rakentamismääräyskokoelman osaa C2, jossa on annettu rakennusten toimivuutta kosteuden kannalta koskevat määräykset ja ohjeet. Rakentamismääräyskokoelmassa on käsitelty rakentamisen kosteudenhallintaa varsin suppeasti, mutta rakennuskosteudesta ja kuivattamisesta on esitetty selkeä vaatimus kappaleessa 1.4.10:

”Rakennusaineet ja -tarvikkeet sekä rakennusosat on suojattava haitalliselta kastumiselta kuljetusten, varastoinnin ja rakentamisen aikana. Kosteiden rakenteiden ja rakennuskosteuden on annettava kuivua tai rakenteita on kuivatettava riittävästi, ennen kuin ne peitetään kuivumista hidastavalla ainekerroksella tai pinnoitteella”

Vuoden 2018 alusta voimaan tulleessa ympäristöministeriön asetuksessa (782/2017, asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta) rakennushankkeen kosteudenhallintaa käsitellään huomattavasti laajemmin suhteessa aiemmin voimassa olleeseen rakentamismääräyskokoelman osaan C2. Rakenteiden kuivumisen osalta uudessa asetuksessa vaatimusta on hiukan terävöitetty:

”Rakennusvaiheen vastuuhenkilön on huolehdittava siitä, että rakenteissa olevan kosteuden ja rakennuskosteuden kuivumisaste mahdollistaa rakenteiden peittämisen kuivumista hidastavalla ainekerroksella, pinnoitteella tai rakenteella vaurioita aiheuttamatta. Rakennusvaiheen vastuuhenkilön on huolehdittava kosteusmittauksin rakenteiden asianmukaisesta kosteuspitoisuudesta seuraavaan työvaiheeseen siirtymistä varten”

Merkittävimpänä muutoksena suhteessa aiempaan lainsäädäntöön on, että vastuu rakenteiden kuivattamisesta säilytetään rakennusvaiheen vastuuhenkilölle ja rakenteiden riittävä kuivuus täytyy todentaa kosteusmittauksin. Asetuksen perustelumuistion (Outinen, 2017) mukaan rakennusvaiheen vastuuhenkilöllä voidaan tarkoittaa käytännössä vastaavaa työnjohtajaa tai erityisalojen työnjohtajaa tai muuta tehtävään osoitettua henkilöä.

Terveystensuojelulaissa (763/1994) asetetaan valmista rakennusta koskevia määräyksiä, jonka mukaan sisätilan kosteusolosuhteet eivät saa aiheuttaa terveyshaittaa sisätiloissa oleville.

3.2 Betonilattian riittävän kuivuuden toteaminen

Betonirakenteiden riittävä kuivuus ennen päällystämistä varmistetaan, jotta

- asennettava lattianpäällyste, kiinnitysliima tai alusmateriaali ei hajoa kemiallisesti tai mikrobivaurioidu liiallisesta kosteudesta,
- tai betonin kosteusliikkeet aiheuta päällysteen irtoamista tai muita päällystevaurioita (Niemi, 2010).

Kuten aiemmassa luvussa on todettu, vaatimus betonirakenteen riittävästä kuivuudesta ennen päällystämistä kuivumista hidastavalla ainekerroksella on esitetty rakentamista koskevassa lainsäädännössä jo kauan. Vuoden 2018 alusta voimassa olleen asetuksen mukaan riittävä kuivuminen on osoitettava kosteusmittauksin. Nykylainsäädännön mukaan riittävää kuivuutta ei siis voi arvioida esimerkiksi pintakosteudenosoittimen, kuivumisaika-arvioiden tai rakennusfysikaalisten mallinnusten avulla. Lainsäädännössä ei kuitenkaan ole määritetty mitä tarkoittaa riittävän kuiva. Aihetta käsittelevässä väitöskirjassa (Merikallio, 2009) todetaankin, että viimekädessä vastuu kosteusraja-arvojen määrittämisestä kuuluu materiaalivalmistajalle. Riittävä kuivuus on riippuvainen esimerkiksi käytetystä lattianpäällyste- tai pinnoitemateriaalista. Karkeasti voidaan sanoa, että tiiviimmät materiaalit vaativat kuivemman alustabetonin kuin läpäisevämmät materiaalit. Poikkeuksena ovat kuitenkin esimerkiksi tiiviit hyvin kosteutta kestävät materiaalit, kuten epoksipohjaiset lattiapinnoitteet.

3.2.1 Olemassa oleva ohjeistus ja raja-arvot

Eri lattiapäällyste- ja pinnoitemateriaaleille on annettu alustabetonin suhteellisen kosteuden enimmäisraja-arvot esimerkiksi seuraavissa julkaisuissa (Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi, 2002), (Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet, 2007) sekä (SisäRYL 2013). Julkaisussa ”Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet 2007” on korostettu erityisesti mittauksen tarkkuuden huomioimista. Seuraavaan taulukkoon 3.1 on koottu lähteestä Merikallio et al. 2002 eri päällystemateriaaleille ja vedeneristeille annettuja yleisiä kansallisia päällystettävyyssraja-arvoja.

Taulukko 3.1. Kansallisia päällystettävyyssraja-arvoja lähteestä Merikallio et al. 2002.

Päällyste-/vedeneristemateriaali	Betonin RH (%) arviointisyvyydellä (A)	Betonin ja/tai ta- soitteen RH (%) pintaosissa
muovi-, kumi- ja linoleumimatot	85	75
tekstiilimatot luonnonmateriaali tai tiivis alusrakenne	85	75
tekstiilimatot täyssynt. ilman tiivistä alusrakennetta	90	75
muovi-, kumi- ja linoleumilaatat	90	75

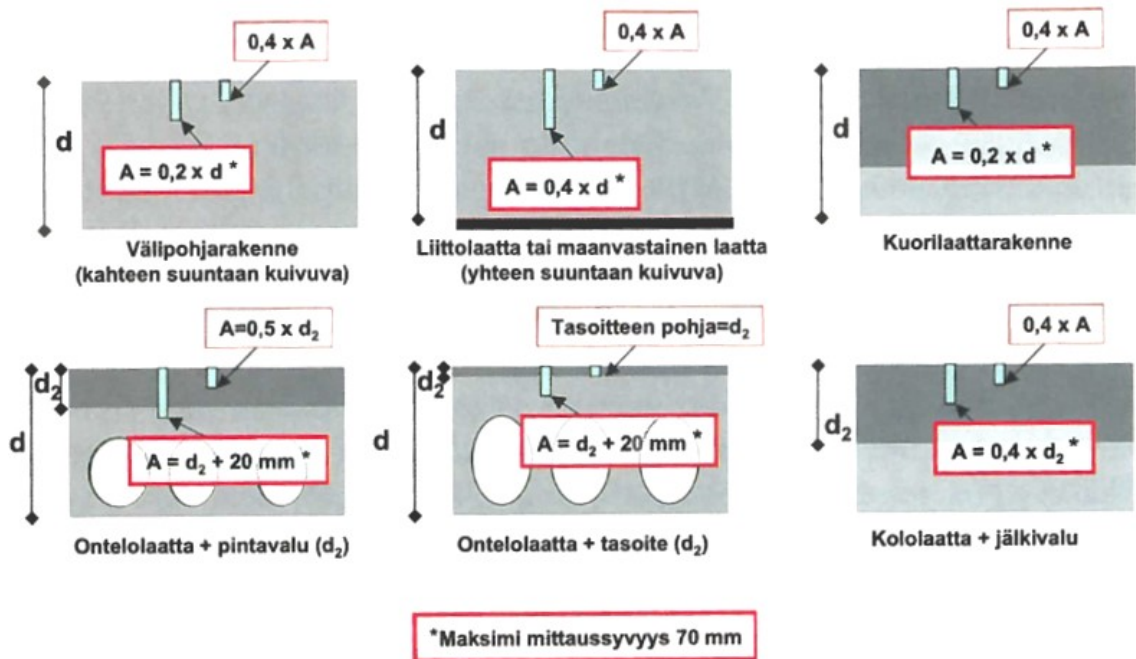
maks sivumitta 60 cm		
alustaan liimattavat parketit normaalibetoni	85	75
alustaan liimattavat parketit erikoisbetoni $v/s < 0,5$	90	75
kelluva lautaparketti tai lami- naatti ja alusmateriaali	85	75
siveltävät vedeneristeet	ei yleisiä raja-arvoja ⁽¹⁾	-
keraamiset laatat	ei yleisiä raja-arvoja ⁽²⁾	-

¹⁾ materiaalivalmistajien ilmoittamat raja-arvot ovat pääasiassa 85 % tai 90 %

²⁾ sallittu alustabetonin kosteuspitoisuus riippuu kiinnitysjärjestelmän muodonmuutoskyvystä. useimmilla betonilaaduilla kiinnitysjärjestelmältä ei vaadita erityistä muodonmuutoskykyä, mikäli RH arviointisyvyydellä on päällystyshetkellä enintään 80 %

Kuten jo aiemmin todettiin, viime kädessä vastuu päällystettävyyden raja-arvoista on materiaalivalmistajalla. Lähtökohtaisesti materiaalivalmistajan takuu edellyttää materiaalivalmistajan omien ohjeiden noudattamista. Materiaalivalmistajien ilmoittamat päällystettävyyden raja-arvot voivat kuitenkin erityisesti ulkomaisilla valmistajilla perustua myös eri mittaussuhteeseen tai eri mittausmenetelmään. Epäselvissä tapauksissa päällystettävyyden raja-arvo ja soveltuva mittausmenetelmä tuleekin selvittää materiaalivalmistajalta. Käytännössä kaikki markkinoilla olevat materiaalivalmistajat tai maahantuoja eivät kuitenkaan ole selvittäneet alustabetonin suhteellisen kosteuden enimmäisraja-arvoja markkinoilleen tuotteille.

Kuivumisvaiheessa betonilattian poikkileikkauksessa vallitsee pystysuuntainen kosteusjakauma. Rakenne on kuivempi läheltä haihduttavaa- tai haihduttavia pintoja kuin syvemältä rakenteesta. Kosteusjakaumassa alkaa tapahtua tasaantumista, kun betonirakenne päällystetään kuivumista hidastavalla ainekerroksella. Tämä tarkoittaa sitä, että päällystämisen jälkeen kosteuspitoisuus lattianpäällysteen alla nousee aina. Tästä syystä päällystettävyyden kosteusraja-arvot on määritetty rakennetyypistä riippuvalla arviointisyvyydellä. Arviointisyvyydellä olevan kosteuspitoisuuden on tarkoitus edustaa kosteushetkellä sitä suhteellista kosteuspitoisuutta, jonka rakenteen pintaosat enimmillään voivat saavuttaa kosteusjakauman tasaantuessa. Arviointisyvyudet määritetään rakennetyypin ja rakennekerrosten paksuuden avulla. Arviointisyvyuden määrittäminen eri tyyppisille rakenteille on kuvattu seuraavassa kuvassa 2.9. Kuvassa on mukana tyypillisimmät rakennetyypit, mutta ei luonnollisestikaan kaikkia käytössä olevia rakennetyyppejä.



Kuva 2.9. Eri rakennetyyppien mittaussyvyysien määrittäminen. Arviointisyvyydellä A on alitettava päällystemateriaalin edellyttämä kriittinen suhteellisen kosteuden raja-arvo. Lisäksi mittaus tehdään rakenteen pintaosista, jossa rakenteen kosteuspitoisuuden päällystyshetkellä tulisi olla alle 75 % RH. (kuvan lähde: Merikallio et al. 2007)

Julkaisussa betonirakenteiden päällystämisen ohjeet 2007 mainitaan kuitenkin, että yllä esitetyistä mittaussyvyyksistä ja kosteusraja-arvoista voidaan poiketa, mikäli varmistetaan siitä, että kosteuspitoisuus betonin pintaosissa ei nouse yli päällystemateriaalien kanalta kriittisen kosteuspitoisuuden.

3.2.2 Kosteusmittausmenetelmät

Betonin päällystettävyyden raja-arvot ilmoitetaan betonin huokosrakenteen suhteellisen kosteuspitoisuutena tietyiltä syvyyksiltä. Tästä syystä mittausmenetelmänä tulee käyttää suoraan suhteellista kosteutta mittaavaa menetelmää. Mittausmenetelmät, joissa kosteuspitoisuus muunnetaan suhteelliseksi kosteudeksi jostakin muusta yksiköstä, kuten painoprosenteista tai sähkönjohtavuudesta, voi antaa merkittävää virhettä mittaustulokseen. Esimerkiksi pintakosteudenosoittimen, karbidimittarien ja erilaisten vastusmittarien toiminta ei anna riittävän luotettavaa kuvaa betonin suhteellisesta kosteuspitoisuudesta (päällystämisen ohjeet).

Ohjekortissa RT 14-1098 *Betonin suhteellisen kosteuden mittaus* on kuvattu eri kosteusmittausmenetelmiä sekä niiden luotettavuutta. Julkaisun mukaan tarkkoja työmaaoloihin soveltuvia betonin suhteellisen kosteuden mittausmenetelmiä, jotka soveltuvat päällystettävyyden arviointiin ovat:

- porareikämittaus (mittaus rakenteeseen poratusta reiästä) ja
- näytepalamittaus (mittaus betonirakenteesta irrotetusta näytepalasta)

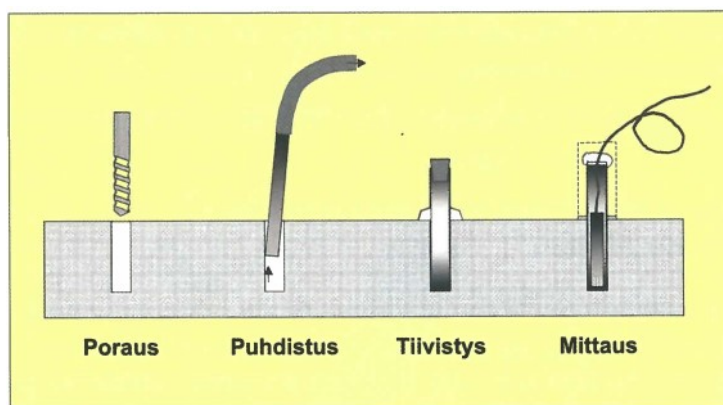
Ohjekortissa mainitaan lisäksi muita suuntaa-antavia kosteusmittausmenetelmiä, joita voidaan julkaisun mukaan käyttää, jos tarkkojen kosteusmittausten tekeminen ei ole mahdollista tai mittaustarkkuudella ei ole suuria vaatimuksia. Suuntaa-antaviin menetelmiin on listattu:

- porareikämittaus toistuvasti samasta reiästä
- mittaus valuun asennetusta mittaputkesta
- näytepalamittaus normaalia pienemmällä näytemäärällä, epätarkalla mittaussyvyydellä tai asentamatta mittapäätä välittömästi koeputkeen
- porareikämittaus putkittamattomasta reiästä
- mittaaminen jatkuvasti betonin sisällä olevalla anturilla
- tarkastelut pintakosteusilmaisimella

Tämän tutkimuksen kannalta on oleellista kuvata tarkemmin kokeellisessa osuudessa käytetyt menetelmät; näytepalamittaus, mittaputkimittaus sekä viiltomittaus. Mittaputkimittaus on sovellutus edellä esitettyjen suuntaa antavien mittausten kahdesta ensimmäisestä menetelmästä. Viiltomittauksista taas voidaan käyttää joustavien lattiapäällysteiden alapuolisen kosteuspitoisuuden määrittämiseen jo päällystetyissä rakenteissa. Näiden lisäksi porareikämittausmenetelmän tarkempi kuvaus tämän työn yhteydessä on nähty tarpeelliseksi, koska se on Suomessa yleisimmin käytetty mittausten menetelmä määrittäessä betonin suhteellista kosteutta ennen rakenteen päällystämistä.

Porareikämittaus

Porareikämittauksessa rakenteeseen porataan reikä halutulle mittaussyvyydelle, reikään asennetaan ilma- ja vesihöyrytiiviisti reiän reunat sulkeva putki siten, että putken tila on avoinna betoniin ainoastaan reiän pohjalta halutulta mittaussyvyydeltä. Mittausputken huoneilmaan avoin pää suljetaan ilma- ja vesihöyrytiiviisti ja putkessa olevan ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden annetaan tasaantua mittaussyvyydeltä putkeen avoinna olevan betonin huokosverkoston kanssa tasapainoon. Ohjejulkaisussa annettu vähimmäisaika tasaantumiseksi on 3 vrk. Porareikämittausten suorittaminen vaatii aina kaksi erillistä käyntiä työmaalla ja mittaustulosten saaminen kestää vähintään tasaantumisaajan verran. Porareikämittauksen eri vaiheita on havainnollistettu seuraavassa kuvassa 3.1.

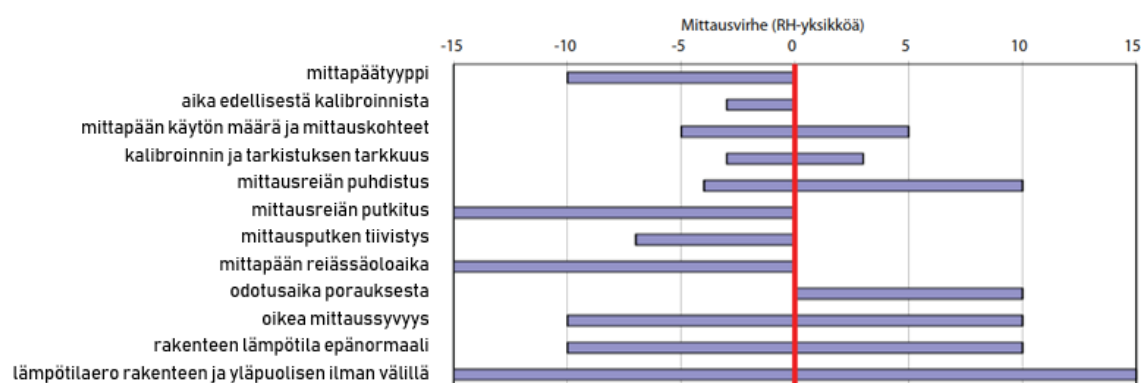


Kuva 3.1. Porareikämittauksen eri vaiheet. (kuvan lähde Merikallio et al. 2007)

Työmaaoloissa tehtävissä porareikämittauksissa aiheuttaa usein haasteita menetelmälle asetetut vaatimukset mittaushetken olosuhteista. Alla on listattu ohjejulkaisussa lueteltuja rajoitteita porareikämittausmenetelmän käytölle.

- Mittaushetken lämpötilan tulisi vastata rakennuksen normaalia käyttölämpötilaa (poikkeama alle 5 °C) ja mittaustavalle annettua suosituslämpötila-aluetta +15...25 °C.
- Mitattavan rakenteen ja mittauskohdan yläpuolelta mitatun ilman lämpötilaero ei saa mittaushetkellä olla yli 2 °C.
- Olosuhteiden on pysyttävä riittävän vakaina koko mittauksen ajan eli vähintään 3 vrk. Riittävän vakaata olosuhdetta ei ole määritelty
- Mikäli mittauksia suoritetaan lattialämmityksen vaikutusalueella, lämmitys on katkaistava viikkoa ennen mittaushetkeä.

Alla olevassa kuvassa on esitetty porareikämittauksen epätarkkuustekijöitä tavanomaisessa mittaustilanteessa, jossa betonin pinta on kuivempi kuin sisäosat.



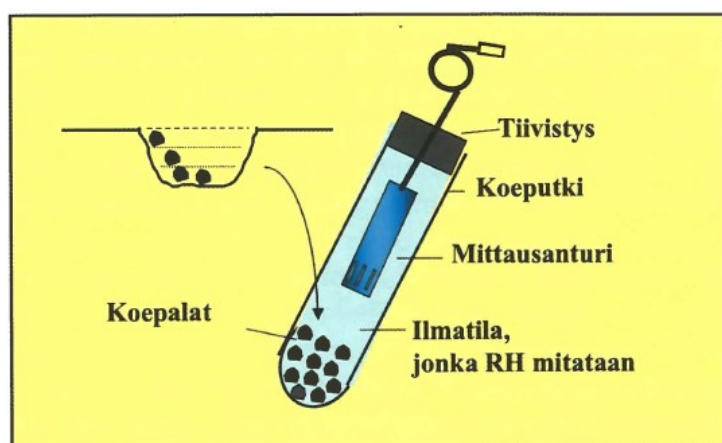
Kuva 3.2. Porareikämittauksen mahdolliset epätarkkuustekijät ja niiden suuruusluokat. Jos betoni on pintaosistaan kastunut saattaa porareikämittauksen putkitus- ja tiivistystekijä aiheuttaa yhtäläisen virheen myös liian kosteaan suuntaan. (RT 14-10984, 2010)

Kuten kuvasta 3.2 nähdään, mittausten menetelmässä on runsaasti merkittäviä epävarmuustekijöitä. RT-ohjekortin mukaan useimmat kuvan epävarmuustekijät on mahdollista eli-

minoida tai minimoida tasoon ± 2 RH-yksikköä ja saada kokonaismittaustarkkuus vähintään ± 5 RH-yksikköä tekemällä mittaukset huolellisesti ohjekortissa esitetyn mukaisesti. Lähteessä (Niemi, 2019) todetaan, että kokonaismittaustarkkuudessa päästään tasolle $\pm 2...3$ RH-yksikköä suorittamalla mittaukset ohjekortin mukaisella tarkan mittauksen periaatteella. Niemen mukaan RT-korttia laadittaessa on ollut tarkoituksena, että noudattamalla tinkimättä annettuja tarkan mittauksen ohjeita voidaan normaaleissa työmaalla tehtävissä päällystettävyyden arviointimittauksissa tuloksia verrata suoraan annettuihin raja-arvoihin, eikä erillistä virhearviota ole välttämätöntä tehdä.

Näytepalamittaus

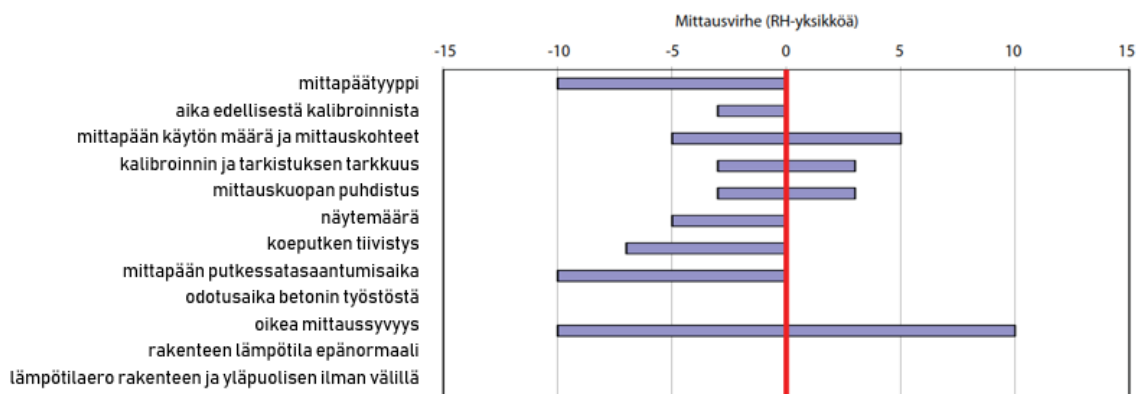
Näytepalamittauksessa mitattavasta rakenteesta otetaan näytepaloja poraamalla tai piikkaamalla halutuilta syvyyksiltä. Näytepalat laitetaan koeputkeen siten, että kultakin syvyydeltä otetut näytepalat laitetaan omiin koeputkiinsa. Näytepaloja suositellaan otettavaksi kahteen rinnakkaiseen koeputkeen kultakin syvyydeltä mittausvirheen mahdollisuuden eliminoimiseksi. Mikäli samalta syvyydeltä otettujen rinnakkaisten mittaustulosten ero on suurempi kuin 3 %-yksikköä, on mittaus uusittava tai selvitettävä poikkeaman syy. Koeputkiin asennetaan kosteusmittapää ja koeputket suljetaan ilma- ja vesihöyrytiiviisti. Koeputket siirretään tilaan, jonka lämpötila vastaa tilan käytönaikaista lämpötilaa. Koeputkessa olevan ilman ja näytepalojen annetaan tasaantua hygroskooppiseen tasapainokosteuteen, jonka jälkeen kosteusmittapäästä luetaan suhteellisen kosteuden lukema. Näytepalojen ja koeputken riittävänä tasaantumisaikana pidetään normaalitapauksissa 12 h. Näytepalamittaus vaatii vain yhden työmaakäynnin ja mittaustulosten saaminen kestää vähintään tasaantumisaajan verran. Näytepalamittauksen eri vaiheita on havainnollistettu seuraavassa kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Periaatekuva näytepalamittauksesta.

Näytepalamittauksen etuna on, että sitä voidaan käyttää lähes kaikissa olosuhteissa. Menetelmälle annettu suosituslämpötila-alue on $-20...+80$ °C. Rakenteen ja ympäröivän ilman välisellä lämpötilaerolla ei ole vaikutusta mittaustarkkuuteen, koska näytepalojen annetaan joka tapauksessa tasaantua haluttuun käyttölämpötilaan.

Seuraavassa kuvassa 3.4 on esitetty näytepalamittauksen mahdollisia epätarkkuustekijöitä tavanomaisessa mittaustilanteessa, jossa betonin pinta on kuivempi kuin sisäosat.



Kuva 3.4. Näytepalamittauksen mahdolliset epätarkkuustekijät ja niiden suuruusluokat. (RT 14-10984, 2010)

Näytepalamittausmenetelmässä epävarmuustekijöiden määrä on hiukan vähäisempi kuin porareikämittauksissa, mutta mukana on kuitenkin erittäin merkittäviä tekijöitä, joiden huomiotta jättäminen voi heikentää mittaustulosten tarkkuutta oleellisesti. RT-ohjekortissa tai muissa lähteissä ei ole erikseen arvioitu numeerista kokonaisvirhettä näytepala- ja porareikämittauksille vaan kokonaisvirheen arvioinnissa voidaan soveltaa porareikämittauksen yhteydessä tehtyä virhetarkastelua.

Mittaputkimittaus

Mittaputkimittauksessa mitattavaan betonirakenteeseen asennetaan ennen valua mittausputket, joiden toinen pää asennetaan betonin sisään halutulle sijainnille ja mittaussyvyydelle. Toinen pää jätetään valun ulkopuolelle. Valun sisään jäävän mittausputken pää valmistellaan ennen mittausputken asennusta siten, että mittausputken avoin pää voidaan asentaa mahdollisimman tarkasti halutulle mittaussyvyydelle. Koejärjestelyissä mittausputket asennettiin vaakatasoon. Tästä syystä, valun sisään jääneiden mittausputken, päät tulattiin ja mittausputken yhdelle sivulle työstettiin tasaantumisreikiä. Tasaantumisreikien kautta valun sisällä olevan mittausputken ilmatila tasaantui samaan hygroskoop-piseen kosteuspitoisuuteen kuin betonin huokostila tasaantumisreikien syvyydeltä. Mittaputkien valun ulkopuolelle jätetyt päät tulpataan vesihöyrytiivisti ja niiden kautta mittaputkiin voidaan asentaa suhteellisen kosteuden mittapää. Mittaputkimittauksissa mittapäitä voidaan pitää mittaputkien sisällä jatkuvasti tai mittapää voidaan asentaa mittaputkiin vain tasaantumisen ja lukemien oton ajaksi. Koejärjestelyissä mittaputket asennettiin vain tasaantumisen ja lukemienoton ajaksi. Valokuvia mittaputkimittauksen toteutuksesta koekohteessa A on esitetty mittausjärjestelyiden kuvauksen yhteydessä luvussa 4.6 mittausten suorittaminen.

Mittaputkimittaukset vaativat etukäteisvalmisteluita ja mittauspäikat ja syvyydet tulee määrittää jo ennen valua. Mittaputkimenetelmä on kevyt mittaussuomenetelmä verrattuna

näytepala- ja porareikämittauksiin kohteissa, joissa halutaan useita perättäisiä suuntaa antavia mittaustuloksia useilta eri syvyyksiltä ja mittauskohdilta. Mittaputkimenetelmän mahdolliset epävarmuustekijät ovat käytännössä samoja kuin porareikämittausmenetelmässä. Lisäksi mittaputkimenetelmään tuo mahdollista epävarmuutta seuraavat tekijät:

- mittaussyvyyttä ei voida luotettavasti varmistaa mittaushetkellä
- mittaputken tiivistyksen vuotaminen
- olosuhdevaihteluiden vuoksi putkeen mahdollisesti tiivistyvä kosteus
- mittaputken ja betonin rajapinnassa kuivuminen voi olla nopeampaa kuin muualla rakenteessa

RT-ohjejulkaisussa ei arvioitu erikseen mittaputkimenetelmän kokonaismittausvirhettä, mutta oletettavasti mittausrvirhe voi olla suurempi kuin näytepala- ja porareikämittauksille arvioitu suuruusluokka ± 5 RH-yksikköä. Mittaputkimenetelmällä mitatut tulokset tulisi lähtökohtaisesti todentaa joko porareikä tai näytepalamittauksilla eikä niitä suositella yksinään käytettäväksi riittävän kuivuuden arviointiin ennen päällystystä vesihöyrytiiviillä lattiapäällysteillä.

Viiltomittaus

Viiltomittausmenetelmä on kuvattu ohjejulkaisussa ”Betonilattiarakenteiden kosteuden hallinta ja päällystäminen”. Mittausmenetelmässä joustavaan lattianpäällysteeseen, esimerkiksi muovimattoon, tehdään noin 5-10 cm leveä viilto. Lattianpäällysteen alle työnnetään viillon kautta kosteusmittapää. Kosteusmittapään varren ja lattianpäällysteen raja-kohta tiivistetään vesihöyrytiiviiksi muotoiltavalla tiivistemassalla. Lattianpäällysteen alle muodostuvan ilmatilan ja kosteusmittapään annetaan tasaantua kiinnitysliimakerroksen ja betonin pintaosan kanssa hygroskooppiseen tasapainokosteuteen. Tasaantuminen kestää tavanomaisesti käytössä olevilla kosteusmittapäillä noin 15 minuuttia. Tasaantumisen jälkeen luetaan mittapäiden suhteellisen kosteuden ja lämpötilan lukemat. Valokuvia viiltomittauksen toteutuksesta koekohteessa B on esitetty mittausjärjestelyiden kuvauksen yhteydessä luvussa *4.6 mittausten suorittaminen*.

Viiltomittausmenetelmää voidaan käyttää suuntaa-antavana mittausmenetelmänä tarkasteltaessa vesihöyrytiivin joustavan lattianpäällysteen alapuolista suhteellista kosteuspitoisuutta päällystämisen jälkeen. Menetelmässä ei varsinaisesti mitata betonin kosteutta vaan lattianpäällysteen alapuolisen kiinnitysliimakerroksen suhteellista kosteuspitoisuutta. Menetelmää käytetään erityisesti vanhojen rakennusten kuntotutkimusten yhteydessä epäiltäessä kohonnutta kosteuspitoisuutta tiiviillä lattianpäällysteellä päällystetyssä betonirakenteessa. Viiltomittauksia yksinään ei tulisi käyttää korjaustarpeen määrittämisessä vaan kohonnut kosteuspitoisuus tulisi aina varmentaa näytepala tai porareikämittauksella.

Viiltomittausmenetelmän merkittävimpiä epävarmuustekijöitä ovat:

- mittapäätyyppi, mittapään käytön määrä
- aika edellisestä kalibroinnista ja kalibroinnin tarkkuus
- mittapään ja lattiaanpäällysteen rajakohdan tiivistäminen
- tasaantumisaika
- rakenteen lämpötila
- lämpötilaero rakenteen ja yläpuolisen tilan välillä

Lähdekirjallisuudesta ei löytynyt arvioita kokonaismittausvirheen suuruudesta, mutta menetelmää pidetään lähdekirjallisuudessa epätarkempana kuin esimerkiksi porareikä- ja näytepalamittauksia. Käytännön mittauksissa on havaittu viitteitä poikkeavista mittaus-tuloksista erityisesti korkeissa mittauslämpötiloissa (Sami Niemi, 2018).

3.2.3 Kuivumisaika-arviot

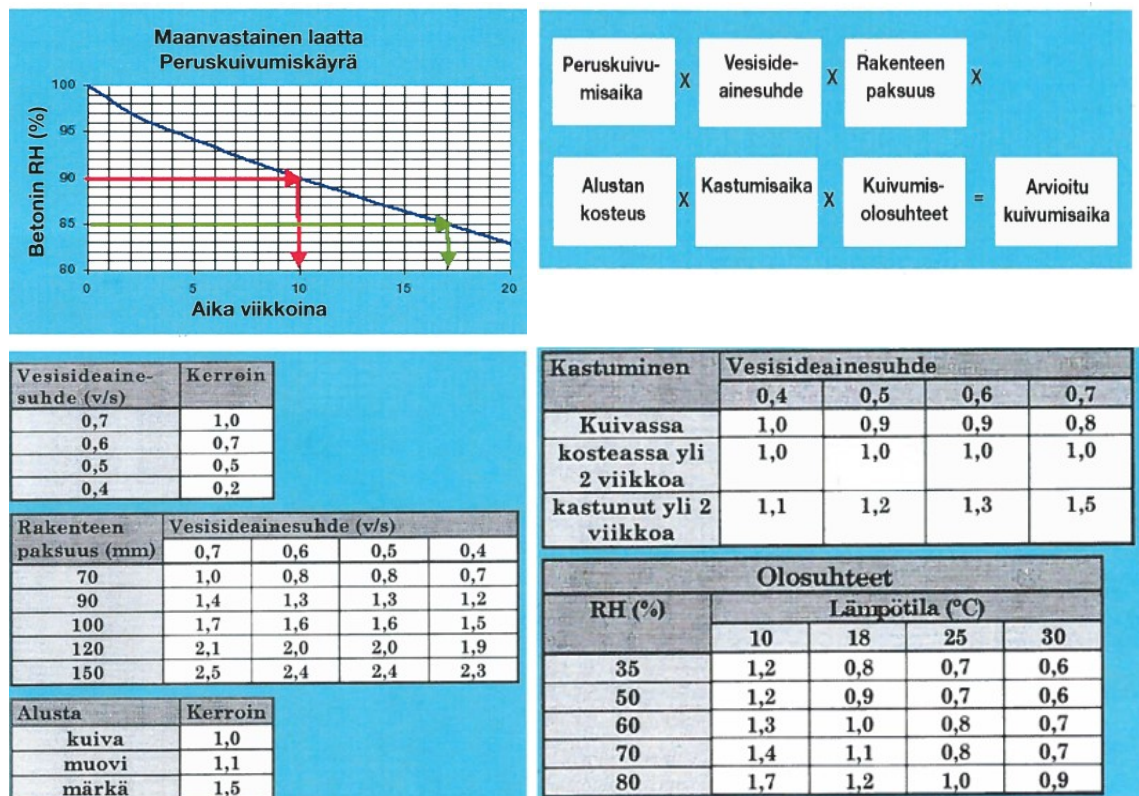
Betonirakenteiden kuivumisajan arviointiin on kehitetty erilaisia ohjeita ja laskentakaa-voja. Yksinkertaisin lienee rakennuslalla edelleen käytössä oleva vanha nyrkkisääntö: ”betoni kuivuu sentti per viikko”. Tämä nyrkkisääntö ottaa huomioon ainoastaan yhden rakenteen kuivumisaikaan vaikuttavan tekijän eli rakennepaksuuden, mikä voi johtaa täysin virheelliseen arvioon rakenteen kuivumisajasta. Yksityiskohtaisempi ja kansallisesti kenties käytetyin ohjeisto on kuvattu julkaisussa Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi (Merikallio 2002). Julkaisun pohjalta on laadittu myös excel-pohjainen laskentaohjelma BY1021. Merikallion ohjeiston kuivumisaika-arviot määritetään raken- netyypistä ja tavoitekosteuspuiteosuudesta riippuvan peruskuivumisajan ja eri kuivumiste- kijöistä riippuvien kertoimien avulla. Kuvassa 3.5 on esitetty maanvastaisen laatan kui- vumisaika-arvion muodostumiseen vaikuttavat laskentakaaavat ja kertoimet. Merikallion ohjeiston kertoimet ja peruskuivumisajat pohjautuvat pääasiassa TERA 2002 -projektin (tekninen betonirakentaminen) yhteydessä tehtyyn kirjallisuustutkimukseen sekä Humit- test Oy:n toimesta vuosina 1995-2001 rakennustyömailla tehtyihin kosteusmittaustulok- siin.

Merikallion tai muiden vastaavien taulukoiden tai käyrästöjen kuivumisaika-arvioita ei pidetä kovin luotettavina, koska arviointimenetelmät eivät ota huomioon kaikkia kuivu- miseen vaikuttavia tekijöitä (Merikallio 2007). Tästä syystä arviointimenetelmillä ei tule määrittää rakenteen päällystettävyyssajakohtaa vaan se tulee aina selvittää kosteusmittauk- sin. Arviointiohjeistojen tavoitteena on toimia lähinnä työkaluna rakennustyömaan aika- taulua tai kosteudenhallintasuunnitelmaa laadittaessa (Merikallio 2002). Työmaan kos- teudenhallintasuunnitelmaa laadittaessa voidaan vielä reagoida sopivilla toimenpiteillä, jos kuivumisajat muodostuvat liian pitkiksi suhteessa työmaan yleisaikatauluun. Soveltu- via toimenpiteitä kuivumisaikojen lyhentämiseksi ovat esimerkiksi:

- betonilaadun uudelleen valinta nopeammin kuivuvaksi betoniksi

- suunniteltujen kuivumisolosuhteiden parantaminen tai muun kuivatusjärjestelmän hyödyntäminen
- suunnitellun sääsuojauksen parantaminen betonin kastumisen estämiseksi
- päällystemateriaalin vaihtaminen kosteamman asennusalustan sallivaksi
- työjärjestyksen muuttaminen siten, että kuivumiselle jää enemmän aikaa

Kuvaan 3.5 on koottu esimerkiksi maanvastaisen laatan kuivumisaika-arvion muodostumiseen vaikuttavien kertoimien ja muiden tekijöiden muodostuminen.



Kuva 3.5. Maanvastaisen laatan kuivumisaika-arvion muodostuminen. Vasemmalla ylhäällä on esitetty peruskuivumiskäyrä, josta katsotaan peruskuivumisaika vaaka-akselilta tavoitellun kosteuspitoisuuden perusteella. Arvioitu kuivumisaika viikkoina laskeaan laskentakaavalla (oikealla ylhäällä) peruskuivumisaajan ja taulukoista valittujen kuivumistekijöiden kertoimien perusteella. (kuvan lähde Merikallio 2002)

Seuraavassa taulukossa 3.2 on laskettu tutkimuksessa mukana olleen koekohteen A maanvastaiselle rakenteelle kaksi vaihtoehtoista kuivumisaika-arviota. Arviot on laskettu tavoiteolosuhteissa tapahtuvalle kuivumiselle ja toteutuneissa olosuhteissa tapahtuvalle kuivumiselle. Pääosa kuivumistekijöiden kertoimista ovat samoja. Kertoimet eroavat sisäilman olosuhdekertoimen ja betonin valun jälkeisen kastumiskertoimien osalta. Käytetyt kertoimet ja kerrointen perusteena olevat kuivumistekijöiden ”arvot” on esitetty taulukossa.

Taulukko 3.2. Koekohteen A maanvastaisen alapohjarakenteen kuivumisaika-arviot tavoiteolosuhteissa ja toteutuneissa olosuhteissa.

kuivumistekijä	tavoiteolosuhteet		toteutuneet olosuhteet	
	kuivumistekijän arvo	kerroin	kuivumistekijän arvo	kerroin
kosteusraja-arvo	85	17,0	85	17,0
vesisementtisuhte	0,7	1,0	0,7	1,0
rakenteen paksuus	100	1,7	100	1,7
alustan kosteus	kuiva	1,0	kuiva	1,0
kastuminen	kuivassa	0,8	kastunut yli 2 vk.	1,5
olosuhteet (RH/T)	50/20	0,8	59/19	1,0
kuivumisaika-arvio	18 viikkoa		43 viikkoa	

Kuten yllä olevasta taulukosta nähdään eroavat saman rakenteen eri olosuhteissa tehdyt kuivumisaika-arviot merkittävästi toisistaan. Suurimman eron aiheuttaa eri ”kastumiskerroin”. Pelkästään rakenteen kastuminen kahden viikon ajan valun jälkeen (kerroin 1,5) lähes kaksinkertaistaa kuivumisaika-arvion suhteessa optimitilanteeseen, jossa rakenne pysyisi kuivana valun jälkeen (kerroin 0,8). Olosuhteiden poikkeaminen optimiolosuhteista pidentää kuivumisaika-arviota 20 %.

Huomion arvoista on, että pienemmän vesisementtisuhteen betoneilla kastumisen vaikutus olisi huomattavasti pienempi. Kuvan 3.5 mukaan esimerkiksi vesisementtisuhteen ollessa 0,4, kerroin 2 viikkoa kastuneelle betonille on 1,1 ja kuivana pysyneelle betonille 1,0. Koekohteessa B oli käytössä korkeamman lujuusluokan rakennebetoni, jossa vesisementtisuhte on todennäköisesti ollut alhaisempi. Kuivumisaika-arvioita ei kuitenkaan voitu tehdä koekohteen B rakenteelle Merikallion taulukoiden avulla, sillä tutkittavan välipohjan rakennepaksuus 400 mm ylittää reilusti Merikallion taulukoissa olevan maksimirakennepaksuuden 300 mm.

3.2.4 Rakennusfysikaalinen mallintaminen

Rakenteiden riittäviä kuivumisaikoja voidaan arvioida myös rakennusfysikaalisten mallinnusohjelmien avulla. Tällä hetkellä käytössä olevia mallinnusohjelmistoja ovat muun muassa COMSOL-multiphysics, TorkaS ja WUFI ohjelmistot. Laskentaohjelmistojen etuna esimerkiksi laskentataulukoilla tehtäviin kuivumisaika-arvioihin on, että ohjelmistoilla voidaan simuloida muuttuvia kuivumisolosuhteita. Suurimmat haasteet luotettavien kuivumisaika-arvioiden tuottamisessa ovat betonin haihtumiskuivumisen nopeuteen vaikuttavien materiaaliominaisuuksien määrittämisessä (Korkala 2018).

Aiemmin vuonna 2008 Merikallio tuli väitöskirjassaan siihen johtopäätökseen, että päällystettävyyden arvioinnissa tulisi siirtyä kosteusmittauksista laskennalliseen mallintamiseen. Merikallion totesi tuolloin, että luotettavat mallinnustulokset ja betonin kuivumisen mallintamisen yleistyminen vaativat mallinnusohjelmien kehittymistä ja materiaaliparametrikirjastojen kehittymistä.

Betonirakenteiden kuivumista tarkastelevassa diplomityötasoisessa tutkimuksessa (Korkala 2018) todetaan, että mallinnetuissa kuivumisaika-arvioissa on edelleen epätarkkuutta puutteellisten materiaaliparametrien vuoksi, eikä mallinnusta voida vielä suoraan käyttää päällystettävyyden arviointiin. Korkalan mukaan tällä hetkellä rakennusfysikaalista mallintamista voidaan hyödyntää esimerkiksi päällystettävyyden riskien arvioinnissa tai eri päällystemateriaalien kriittisten kosteuspitoisuuksien tarkemmassa määrittämisessä. Vuoden 2018 alusta lähtien lainsäädäntö edellyttää kosteusmittausta ennen rakenteen päällystämistä kuivumista hidastavalla ainekerroksella. Kehitys ei siten kaikilta osin ole mennyt Merikallion ennustamaan suuntaan.

3.3 Tarkasteltava kuivatusjärjestelmä

3.3.1 Taustaa

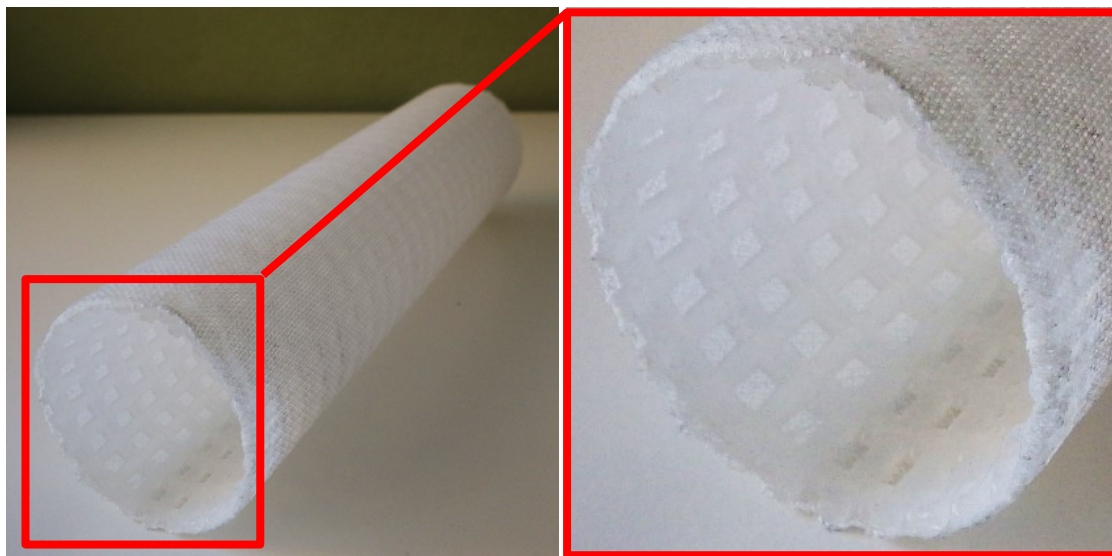
Tavanomaisesti betonirakenne kuivuu rakenteen pintojen kautta haihtumalla. Tasomaisissa betonirakenteissa on kaksi pintaa ylä- ja alapinta, joiden kautta kuivumista voi tapahtua. Monissa rakennetyypeissä, kuten maanvarainen alapohja tai kuorilaattarakenne alapinnan kuivuminen on estetty, joten kuivumista tapahtuu ainoastaan yhteen suuntaan. Betonin kuivuminen on verrattain hidasta verrattuna muihin rakentamisessa käytettäviin materiaaleihin. Useimmissa rakennuskohteissa erityisesti betonilattian kuivuminen on sisävalmistusvaihetta tahdistava työvaihe ja usein koko rakentamisaikataulu pohjautuu pitkälti betonirakenteiden kuivumisaika-arvioihin.

Betonirakenteiden riittävä kuivuminen on merkittävä erityisesti, kun rakenne päällystetään vesihöyrytiiviillä tai kosteusherkällä ainekerroksella. Tavanomaisesti betonirakenteiden riittävä kuivuus ennen päällystämistöitä varmistetaan pistokoeluonteisesti kosteusmittauksin. Mikäli betonirakenteiden riittävää kuivumista ei ole varmistettu voi seurauksena olla viivästyksiä rakentamisaikatauluun tai pahimmassa tapauksessa lattiapäällysteen tai muun kosteusherkän materiaalin kosteusvaurio betonin rakennuskosteudesta johtuen. (Betonitekniikan oppikirja by 201, 2018)

Betonirakenteen kuivumiseen voidaan vaikuttaa monilla eri keinoilla, kuten betonilaadun valinnalla, lisäaineilla, rakenneratkaisuilla, kuivumisolosuhteilla ja erilaisilla kuivatusjärjestelmillä. Tässä työssä tarkasteltu ilmakiertoinen valuun sisään asennettava kosteudenkeruukanavisto on yksi erikoisratkaisu, jolla pyritään nopeuttamaan betonirakenteiden kuivumisaikoja ja toisaalta mahdollistamaan kosteuden poistumisen myös päällystämisen jälkeen.

3.3.2 Järjestelmän kuvaus

Tarkasteltavaa järjestelmää voidaan käyttää sekä lämmönjakojärjestelmänä että kuivatusjärjestelmänä. Järjestelmän ydin on erikoisvalmisteinen jäykkä betonivalun sisään sijoitettava reiällinen muoviputki. Putken ympärillä on vesihöyryn- ja ilmanläpäisevä ainekerros, joka estää tuoreen betonimassan kulkeutumisen reikien kautta putkistoon, mutta mahdollistaa kosteuden siirtymisen betonista putken sisään. Edellä kuvatusa putkesta käytetään tässä tutkimuksessa nimitystä kosteudenkeruuputki. Putken halkaisija on noin 50 mm, rakenne on esitetty kuvassa 3.6.



Kuva 3.6. Järjestelmän ydin on erikoisvalmisteinen betonivalun sisään sijoitettava jäykkä kosteudenkeruuputki. Putken pinnalla oleva harsomainen ainekerros estää tuoreen betonimassan kulkeutumisen putken sisään. Putken halkaisija on noin 50 mm.

Suorista kosteudenkeruuputkista ja liitososista kootaan piirejä, joiden pituus mitoitetaan kohdekohtaisesti. Tässä tutkimuksessa piirit ovat ainoastaan kuivatuskäytössä, joten tämän tutkimuksen yhteydessä piireistä käytetään nimitystä kosteudenkeruupiiri.

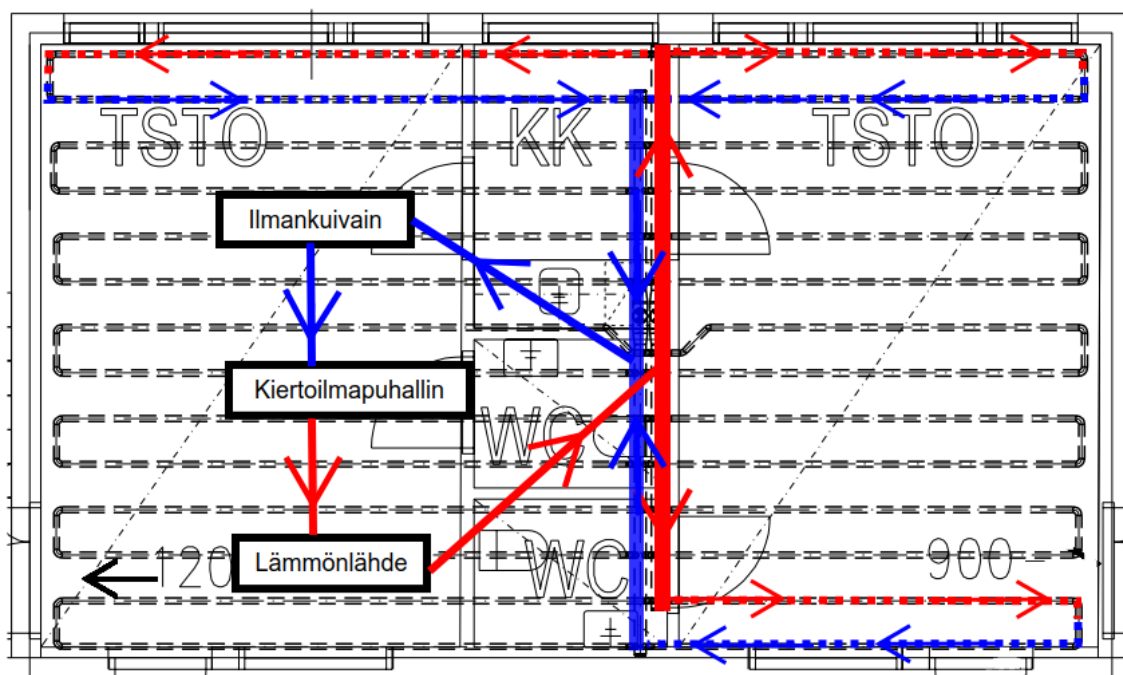
Kosteudenkeruupiirit liitetään umpiputkesta valmistettuihin runkokanavaviin. Tässä tutkimuksessa piiriin sisään johdettavaa ilmaa kutsutaan menoilmaksi ja piiristä palaavaa ilmaa kutsutaan paluuilmaksi. Kosteudenkeruupiirin toinen pää liitetään menoilman runkokanavaan ja toinen pää paluuilman runkokanavaan. Yhteen runkokanavapiiriin (meno- ja paluuilma) voidaan liittää useita kosteudenkeruupiirejä. Tässä tutkimuksessa runkokanavien ja kosteudenkeruupiirien muodostama kokonaisuus kutsutaan kosteudenkeruukanavistoksi. Esimerkki kanavistosta on esitetty kuvassa 3.7.

Kosteudenkeruukanavistoon liitetään kiertoilmapuhallin ja tarvittaessa myös lämmönlähde ja ilmankuivain. Tässä tutkimuksessa kuivatusjärjestelmä määritellään kosteudenkeruukanaviston, kiertoilmapuhaltimen ja mahdollisten lämmönlähteiden ja ilmankuivaimen muodostamaksi järjestelmäksi. Kuivatusjärjestelmän rakenne ja toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.7. Kiertoilmapuhaltimen tehtävänä on kierrättää

ilmaa kosteudenkeruukanavistossa. Tarvittaessa kierrätettävää ilmaa voidaan lämmittää lämmönlähteen avulla haluttuun lämpötilaan ennen kanavistoon puhaltamista. Lämmitetty ilma kiertää kanavistossa ja luovuttaa osan lämpöenergiastaan kuivatuspiirejä ympäröivään betoniin. Saman aikaisesti kanavistossa kiertävään ilmaan sitoutuu kosteutta ympäröivästä betonista. Tarvittaessa kanavistossa kierrätettävän ilman kosteussisältöä voidaan pienentää ilmankuivaimen avulla, jolloin kiertävän ilman ja ympäröivän betonin huokosilman vesihöyryn osapaine-ero kasvaa ja järjestelmän kuivattava vaikutus tehostuu.

Kuivatusjärjestelmästä voidaan tehdä tavanomaisen vesikiertoisien lämmitysjärjestelmän tapaan suljettu piiri, jolloin kanavistossa kierrätetään samaa ilmaa. Lämmönlähde lämmittää kanavistossa jäähtyneen paluuilman uudelleen haluttuun lämpötilaan ja tarvittaessa ilmankuivain poistaa osan kiertävään ilmaan kertyvästä kosteudesta. Tämä tapa on käytössä erityisesti kun järjestelmää käytetään lattialämmityksen lämmönjakojärjestelmänä. Etuna on se, että suljetussa järjestelmässä voidaan seurata kanaviston ilman kosteussisältöä. Äkillisistä kosteuden noususta voidaan havaita esimerkiksi vesivuodot lattiarakenteissa.

Erityisesti rakennusaikaisessa kuivatuksessa kun meno- ja paluuilman kosteussisällön ero on suuri kosteudenkeruukanavistosta voidaan tehdä avoin järjestelmä, jolloin kierrätettävä ilma on ikään kuin ”kertakäyttöistä”. Avoimen järjestelmän etuna on se, että kostea paluuilma voidaan puhaltaa esimerkiksi rakennuksen ulkopuolelle ja kosteudenkeruukanavistoon voidaan puhaltaa ulkoilmasta tai huonetilasta otettua kuivempaa ilmaa. Molemmissa järjestelmissä voidaan käyttää lämmönlähdettä ja ilmankuivainta.

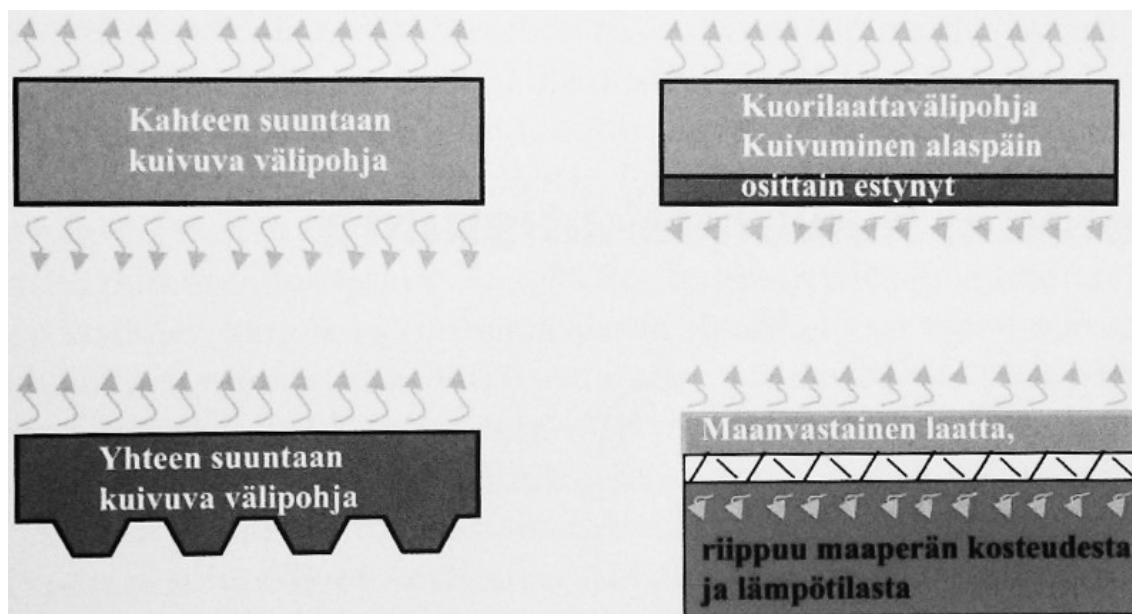


Kuva 3.7. Esimerkki kuivatusjärjestelmän toiminnasta. Esimerkissä on yksi runkokanavapari kuvassa keskellä pystysuunnassa. Kosteudenkeruupiirejä on yhteensä 14 kpl runkokanavien molemmiin puolin. Nuolet kuvaavat ilmavirran suuntaa, punainen väri kuvaa menoilmaa ja sininen väri paluuilmaa. Esimerkissä kiertoilmapuhallin, lämmönlähde ja ilmankuivain on sijoitettu runkokanavien keskelle.

Alun perin järjestelmä on kehitetty takan lämpöä lattiarakenteeseen varaavaksi lämmönjakojärjestelmäksi, mutta tässä tutkimuksessa tarkastellaan ensisijaisesti järjestelmän kykyä poistaa betonin rakennusaikaista kosteutta. Käytettäessä kosteudenkeruukanavistoa rakennuksen käytönaikaisena lämmönjakojärjestelmänä on järjestelmän toimintaperiaate pitkälti analoginen vesikiertoisen lattialämmityksen kanssa. Suurimmat erot järjestelmien välillä johtuvat ilman ja veden lämmönsiirt ominaisuuksien eroista. Veden ominaislämpökapasiteetti on moninkertainen ja veden tiheys yli 1000 kertainen verrattuna vastaaviin ilman materiaaliominaisuuksiin. Tästä syystä ilmakiertoisessa järjestelmässä kiertävän ilmamäärän tulee olla huomattavasti suurempi kuin vesikiertoisen järjestelmän vesimäärän. Tämä johtaa siihen, että ilmakiertoisessa järjestelmässä käytettävän lämmönjakoputken halkaisija ja lämmönsiirtoaineen nopeus ovat huomattavasti suurempia kuin vastaavan vesikiertoisen lämmönjakojärjestelmän tapauksessa.

3.3.3 Järjestelmän kuivattava vaikutus

Tavanomainen betonilattiarakenne kuivuu rakenteen avoimien pintojen kautta haihtumalla yhteen tai kahteen suuntaan riippuen rakennetyypistä. Tavanomaisten rakennetyyppien kuivumista on havainnollistettu kuvassa 3.8. Yleisesti esimerkiksi maanvaraista betonilaattaa käsitellään yhteen suuntaan kuivuvana rakenteena. (Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen, 2007)

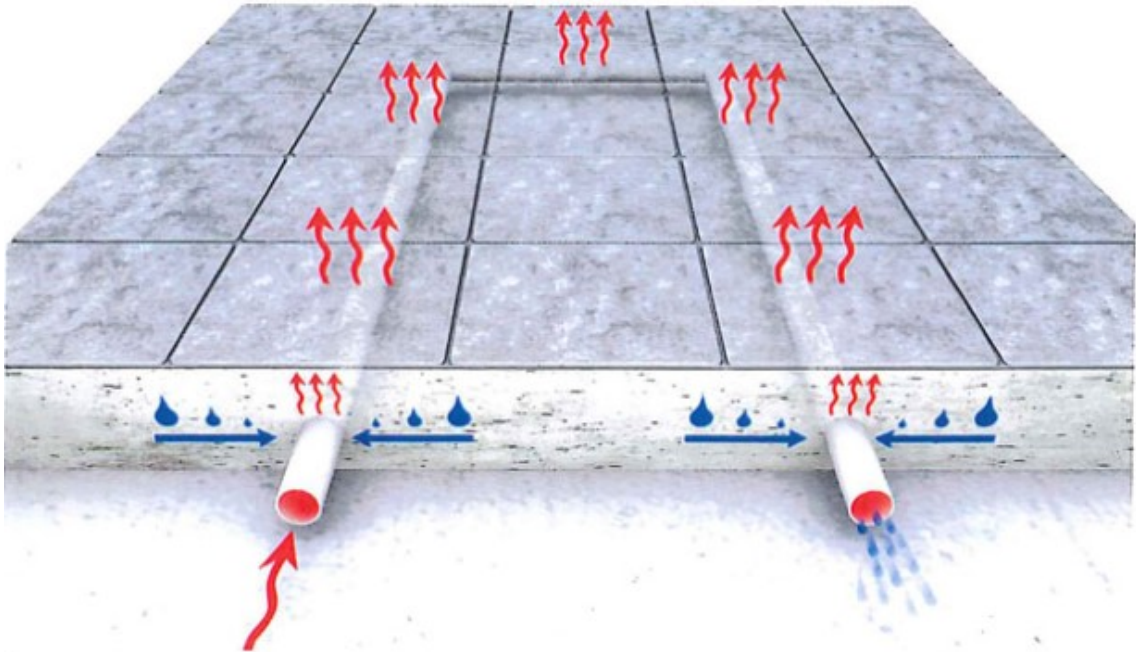


Kuva 3.8. (Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen, 2007). Rakenteen paksuus, kerroksellisuus ja kuivumissuunta vaikuttavat siihen, miten nopeasti betonissa oleva kosteus pääsee rakenteen pintaan ja siitä edelleen haihtumaan rakennetta ympäröivään tilaan. Mitä pidemmän matkan kosteus joutuu rakenteessa siirtymään, sitä hitaampaa kuivuminen on.

Tarkasteltava kuivatujärjestelmä mahdollistaa edellä mainittujen kuivumissuuntien lisäksi kosteuden haihtumisen betonista kosteudenkeruuputkien seinämien läpi ja poistumisen konvektiolla paluuilman mukana. Voidaan siis ajatella, että tarkasteltavalla kuivatusjärjestelmällä varustetussa lattiassa on pintojen lisäksi yksi uusi kuivumissuunta, joka on riippumaton rakennetyypistä. Näin ollen kuivatusjärjestelmä mahdollistaa rakenteen kuivattamisen myös tilanteissa, joissa kuivuminen pintojen kautta on estetty esimerkiksi vesihöyrytiiviillä lattianpäällysteellä. Kosteudenkeruupiirien kautta poistuvan kosteuden määrää voidaan mitata seuraamalla meno- ja paluuilman kosteussisällän erotusta.

Kosteudenkeruukanaviston kautta konvektiolla poistuvan kosteuden lisäksi kuivatusjärjestelmä nostaa kuivatettavan rakenteen lämpötilaa. Rakenteen lämpötilan nousun on todettu nostavan vesihöyryn osapainetta betonin huokosrakenteessa ja kiihdyttävän kosteuden siirtymistä betonissa (Merikallio, 2009). Rakenteen lämpötilan nousun aikaansaamaa kuivatusvaikutusta on analoginen ilmiö vesikiertoisen lattialämmityksen tai niin sanottujen betonin kovetuskaapelien kuivatusvaikutuksen kanssa. Lattialämmityksen vaikutusta betonin kuivumisaikoihin on käsitelty yksityiskohtaisemmin luvussa 3.35 *lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toiminta*. Lämpötilan nosto tehostaa myös kosteudenkeruukanaviston kautta tapahtuvaa kosteuden poistumista rakenteesta. Lämpötilan nousun aiheuttamaa pintojen kautta tapahtuvaa kuivatusvaikutusta ei voida eritellä normaalista pintojen kautta tapahtuvasta haihtumiskuivumisesta. Pintojen kautta tapahtuvaa kuivumista ei tapahdu jos kuivatettava rakenne on pinnoitettu tai päällystetty

vesihöyrytiivillä ainekerroksella ja kosteuden haihtuminen on estetty myös alapinnan kautta. Kuivatusjärjestelmän kuivattavaa vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 3.9.



Kuva 3.9. (Lehtimäki & Tommola, 2015). Järjestelmän kuivattava vaikutus voidaan jakaa kahteen tekijään. Kosteudenkeruupiirien pahuuilman mukana konvektiolla poistuva kosteus (siniset pisarasymbolit) ja lisäksi rakenteen lämmittäminen kiihdyttää kosteuden haihtumista pintojen kautta (pystysuuntaiset punaiset aaltomaiset nuolet).

3.3.4 Aiemmat tutkimukset ja käyttökokemukset

Tarkasteltavaa kuivatusjärjestelmän lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on tutkittu yhdessä Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) tekemässä tutkimuksessa (Leivo & Pentti, 2016) ja yhdessä TTY:lle tehdyssä diplomityössä (Ahvenainen, 2016). Edellä mainittujen tutkimusten lisäksi järjestelmän toimintaa on tarkasteltu kahdessa Tampereen ammattikorkeakoululle case-kohteesta tehdyssä opinnäytetyössä (Oksanen, 2016 ja Majjala, 2016). Tämän tutkimuksen yhteydessä arvioitiin tarkoituksenmukaiseksi tarkastella myös opinnäytetöiden tuloksia työn kirjallisuuskatsausosiossa. Edellä mainituissa kuivatusjärjestelmän kapasiteettia tarkastelevissa tutkimuksissa ja opinnäytetöitä mitattava pääsuure on ollut kosteudenkeruukanaviston kautta betonista poistunut kosteusvirta lattiapinta-alaa nähden aikayksikössä [$\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$]. Edellä mainittujen tutkimusten lisäksi tavanomaisen ainoastaan pintojen kautta kuivuvan betonikoekappaleen pintojen kautta haihtuvan kosteusvirran suuruutta on mitattu vuonna 2002 tehdyssä Kosteusvirta-tutkimuksessa (Lindberg et al, 2002). Tutkimuksessa päällystämättömien koekappaleiden yhden pinnan kautta haihtunut kosteusvirta oli heti jälkihoidon jälkeisinä vuorokausina $4,5 \dots 9,2 \text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$. Kosteusvirta laski jälkihoidon jälkeisten 30 vrk aikana tasolle $0,8 \dots 1,3 \text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$. Aikavälillä 30...90 vrk vapaiden pintojen kautta haihtunut kosteusvirta oli tasolla $0,4 \dots 0,9 \text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$. Betonin pintojen kautta haihtuvan kosteusvirran suuruudesta ei Kosteus-

virta-tutkimusta lukuun ottamatta löytynyt vertailuarvoja lähdekirjallisuudesta. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty yksityiskohtaisemmin tarkasteltavaa kuivatusjärjestelmää käsittelevät tutkimukset.

Leivo et al. on tutkinut kuivatusjärjestelmän lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa kahdessa pientalon uudisrakennuskohteessa Vantaalla. Tutkimuksessa pääpaino oli kosteudenkeruukanaviston meno- ja paluuilman seurantamittauksissa. Tarkoituksena oli tarkastella myös betonilaatan suhteellista kosteutta ja lämpötilaa jatkuvatoimisilla mitta-antureilla. Betonilaatan suhteellisen kosteuden mittauksia ei kuitenkaan voitu suorittaa mittausteknisistä syistä.

Leivon et al. mukaan kosteudenkeruukanaviston kautta poistui kosteutta koko tarkastelujakson ajan. Leivo toteaa, että kuivuminen kanaviston kautta on tehokkainta kuivumisen alkuvaiheessa, kun betonin kosteus kosteudenkeruuputken ympärillä on kapillaarisella alueella. Kanaviston kautta poistuva kosteusvirta hidastuu merkittävästi, kun betoni kuivuu putken ympäriltä ja kosteuden täytyy siirtyä diffuusiolla syvemmältä betonista. Kahden kuukauden mittausjakson aikana tarkasteltavan kosteudenkeruukanaviston kautta poistui kosteutta enimmillään noin $5 \text{ g/m}^2/\text{h}$ ja kosteusvirta oli keskimäärin noin $1 \text{ g/m}^2/\text{h}$.

Ahvenainen on tutkinut diplomityössään kuivatusjärjestelmällä varustetun maanvaraisen 120 mm koelaatan ja ilman kuivatusjärjestelmää olevan verrokkilaatan kuivumista. Koelaatan ja verrokkilaatan kuivumista seurattiin mittaamalla suhteellisen kosteuden arvoja valun sisään asennetuista mittaputkista sekä kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvan kosteusvirran määrää meno- ja paluuilman seurantamittauksilla. Ahvenaisen tutkimuksessa kuivatusjärjestelmää oli tehostettu suhteessa Leivon et al. tutkimukseen liittämällä kuivatusjärjestelmään lämmittimen ja puhaltimen lisäksi ilmankuivan ja osittaiselle alueelle myös sähkövastus kosteudenkeruupiirien väliin nostamaan rakenteen lämpötilaa. Tutkimuksessa varioitiin piirien k-jakoa, sähkövastuksen, kuivaimen ja kanavalämmityksen käyttöä sekä rakenteen päällystämistä haihtumista hidastavalla ainekerroksella.

Ahvenaisen tutkimuksen mukaan kuivatusjärjestelmällä oli vaikutusta betonilattian kuivumisnopeuteen. Kuivatetut alueet saavuttivat päällystettävyyden raja-arvot keskimäärin kuukautta ennen verrokkilaattaa. Lämmityskaapelit piirien välissä kasvattivat selvästi kosteudenkeruukanaviston kautta konvektiolla tapahtuvaa kosteusvirtaa ja mittapisteistä mitatut suhteelliset kosteuspitoisuudet olivat alhaisempia kuin lämmittämättömillä alueilla. Ahvenaisen toteaa rakenteen päällystämisestä haihtumista hidastavalla ainekerroksella, että kuivuminen putkijaon keskellä hidastui merkittävästi päällystämisen jälkeen, mutta lähempänä kosteudenkeruuputkea kuivumista tapahtui edelleen. Kuivaimen ja lämmittimen syklistäistä käyntiaikaa tarkasteltaessa Ahvenaisen toteaa tehokkaimmaksi kuivatustavaksi sekä kuivaimen, että lämmittimen jatkuvan käynnin. Betonin suhteellisen kosteuden tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että tutkimuksissa rakenteen suhteellista kosteutta mitattiin suuntaa-antavana pidetyllä mittausmenetelmällä betonin sisään

kiinteästi valetuista mittausputkista. Ahvenaisen tutkimuksessa pelkällä kosteudenkeruukanavistolla varustetussa laattassa keskimääräinen kosteusvirta kanaviston kautta oli noin $10 \text{ g/m}^2/\text{h}$ ja sähkövastuksella tehostetulla alueella noin $20\ldots 25 \text{ g/m}^2/\text{h}$.

Oksanen on tutkinut kuivatusjärjestelmän toimivuutta kosteusvauriutilanteessa ammattikorkeakoulun opinnäytetyössä. Työssä jatketaan Ahvenaisen tekemiä kokeita ja simuloidaan vesivahingon seurauksena kastuneen betonin kuivatustilannetta kastelemalla Ahvenaisen tutkimuksessa kuivatettu koelaatta painovoimaisella veden imeyttämällä ja kuivattamalla laattaa uudelleen. Koelaatan ja verrokkilaatan kuivumista seurattiin mittaamalla suhteellisen kosteuden arvoja valun sisään asennetuista mittaputkista sekä kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvan kosteusvirran määrää meno- ja paluuilman seurantamittauksilla. Oksasen mukaan betonin hallitussa ja tasaisessa kastelemisessa oli suuria haasteita. Osin myös lämpötilan vaihtelut, lyhyt tarkastelujakso ja käytetty mittausmenetelmä aiheuttivat betonin suhteellisen kosteuden mittauksiin varsin paljon epävarmuutta.

Oksasen mukaan kanaviston kautta poistuvan kosteusvirran määrästä saatiin osin varsin luotettavia ja vertailukelpoisia mittaustuloksia. Sähkövastuspuolella mittaustuloksissa havaittiin tosin joitakin poikkeavia mittaustuloksia. Pelkällä kosteudenkeruupiirillä varustetulla alueella kanaviston kautta poistuva kosteusvirran määrä oli keskimäärin noin $7 \text{ g/m}^2/\text{h}$. Menoilman lämpötilan nostolla oli Oksasen mittaustulosten mukaan selkeä vaikutus kosteusvirran määrään. Lämpötilan nosto noin $10 \text{ }^\circ\text{C}$ lisäsi kosteusvirran määrää noin $3 \text{ g/m}^2/\text{h}$. Sähkövastuksella tehostetulla alueella kanaviston kautta poistuva kosteusvirta oli keskimäärin noin $8 \text{ g/m}^2/\text{h}$.

Maijalan ammattikorkeakoululle tekemässään opinnäytetyössä tarkastellaan kuivatusjärjestelmän soveltuvuutta saneerauskohteeseen. Työssä tarkasteltiin 1950-luvun omakotitalon uusitun alapohjarakenteen sekä väli- ja ulkoseinärakenteiden alaosien kuivumista kuivatusjärjestelmän avulla. Työn erityispiirteenä verrattuna aiempiin tutkimuksiin oli, että osalla tutkimuksessa tarkasteltavilla rakenteilla oli rakennuskosteuden lisäksi myös ulkopuolista kosteusrasitusta maaperästä. Maijalan työssä betonin suhteellista kosteutta mitattiin yhdestä pisteestä kahdelta eri syvyydeltä. Mittausmenetelmänä käytettiin porareikämittausta, mutta RT-kortin tarkan mittausmenetelmän ohjeesta poiketen mittauksia tehtiin useamman kerran samoista mittaputkista. Maijalan mittausten mukaan maanvastainen betonilaatta (120 mm) saavutti arviointisyvyydellä (48 mm) suhteellisen kosteuden arvon 85% RH noin 100 vrk iässä.

Maijalan mittaustulosten mukaan kosteudenkeruukanaviston kautta betonista poistuva kosteusvirta oli kuivumisen alkuvaiheen aikana keskimäärin noin $22 \text{ g/m}^2/\text{h}$. Lämmönlähteen vaihtamisen yhteydessä (noin 50 vrk valusta) menoilman lämpötilaa laskettiin noin $12 \text{ }^\circ\text{C}$ ja kosteusvirta asettui $5 \text{ g/m}^2/\text{h}$ tasolle.

3.3.5 Lattialämmitetyn rakenteen rakennusfysikaalinen toiminta

Kuten aiemmin todettiin kosteudenkeruukanaviston kautta konvektiolla poistuvan kosteuden lisäksi kuivatusjärjestelmä nostaa kuivatettavan rakenteen lämpötilaa. Rakenteen lämpötilan nousun on todettu kiihdyttävän kosteuden siirtymistä betonissa, mikä nopeuttaa betonin kuivumista avoimien pintojen kautta. Suljettaessa tarkastelun ulkopuolelle tarkasteltavan järjestelmän kyky poistaa rakennekosteutta kanaviston kautta, voidaan rakenteen kosteus- ja lämpöteknistä toimintaa verrata muihin vastaaviin betonirakenteisiin, jossa lämmönjakojärjestelmä on sijoitettu betonirakenteen sisään. Rakenteen lämpötilan nousun aikaansaamaa kuivatusvaikutus on analoginen ilmiö esimerkiksi vesikiertoisen lattialämmityksen tai niin sanottujen betonin kovetuskaapelien kuivatusvaikutuksen kanssa.

Lattialämmitetyn alapohjan lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on käsitelty varsin kattavasti Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) julkaisussa (Leivo & Rantala, 2005). Betonirakenteen kuivumislämpötilan vaikutusta betonirakenteen kuivumiseen on tutkittu muun muassa ruotsalaisessa tutkimuksessa (Persson, 2003). Edellä mainittuja tutkimuksia on tarkasteltu yksityiskohtaisemmin seuraavissa kappaleissa.

Leivon et al. mukaan merkittävin betonin pintakerrosten kuivumiseen vaikuttava tekijä on betonilaattaa ympäröivän ilman olosuhteet. Betonilaatan lattialämmityksen avulla voidaan kuitenkin nopeuttaa laatan kuivumista jopa 2 viikolla jos laatan lämpötilaa nostetaan riittävästi ja huolehditaan samalla sisäilman riittävän alhaisesta suhteellisesta kosteudesta. Mallinuksissa 5 °C lämpötilan nostolla suhteessa lämmittämättömään laattaan saavutettiin pinnoituskriteeri 6 vrk nopeammin.

Pisteittäisesti lämmitetyssä (esimerkiksi vesi- tai ilmakiertoinen lattialämmitys) betonilaatassa poikkileikkauksen kosteuskentässä on selkeä ero lämmityselementtien läheisyydessä ja lämmityselementtien keskellä. Leivo et. al. toteaa, että pystysuuntainen kosteusjakauma lämmityselementtien keskellä vastaa melko hyvin lämmittämättömän laatan kosteusjakamaa, tästä syystä pinnoituskriteeri tulee määritellä aina lämmityselementtien keskeltä.

Päällystämisen jälkeen pystysuuntainen kosteusjakauma tasaantuu, joka tarkoittaa sitä, että syvemmältä laatasta siirtyy kosteutta betonilaatan pintaosiin ja lattiapäällysteen alaosaan. Lämmitetyssä laatassa lattiapäällysteen alapinnan suhteellinen kosteuspitoisuus nousee nopeammin ja saavuttaa korkeamman maksimikosteuspitoisuuden kuin lämmittämättömässä laatassa (Leivo et. al. 2005).

4 KENTTÄTUTKIMUKSET

4.1 Koekohteet ja mittausjärjestelyiden suunnittelu

Kenttätutkimusten tavoitteena oli tutkimussuunnitelman mukaisesti seurata kuivatusjärjestelmän toimintaa, kuivatuskapasiteettia sekä järjestelmän soveltuvuutta suuremman mittakaavan todellisiin rakennuskohteisiin. Tavoitteena oli saada tutkimukseen 2-3 koekohdetta, joissa on käytetty yleisiä rakennetyyppejä, joiden kosteuskäyttäytymisestä tavanomaisilla kuivatuskeinoilla on tutkimustietoa. Tutkimukseen soveltuvien ja erikoisjärjestelyihin sopeutuvien rakennustyömaiden löytämisessä oli haasteita. Lopulta koekohteiksi saatiin kaksi rakennustyömaata pääkaupunkiseudulta.

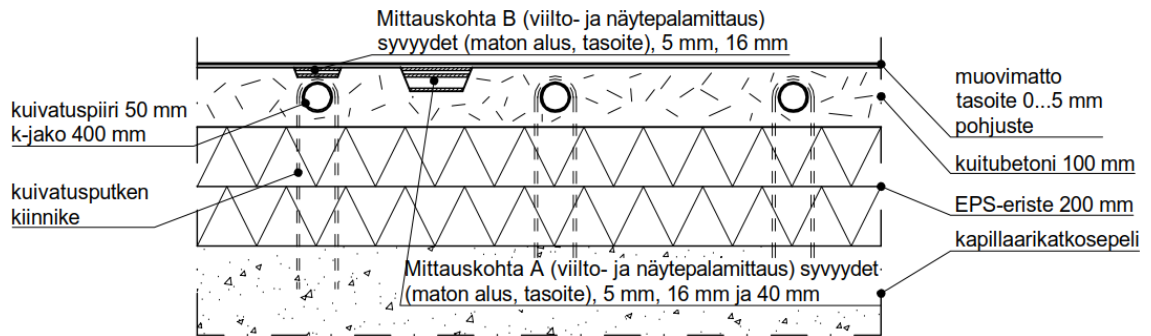
Kuivatus- ja mittausjärjestelyiden suunnittelu täytyi tehdä huomioiden tutkimuksessa mukana olleiden koekohteiden suunnitellut rakenteet, aikataulut ja muut rajoitteet. Kuivatusjärjestelmien suunnittelun teki pääosin Pasi Lehtimäki SafeDrying Oy:stä ja mittausjärjestelyiden suunnitteluun osallistuivat tutkimuksen tekijän lisäksi työn ohjaaja Sami Niemi Vahanen Rakennusfysikka Oy:stä ja Esa Tommola sekä Pasi Lehtimäki SafeDrying Oy:stä.

4.1.1 Koekohde A

Koekohde A on suuren logistiikkakeskuksen uudisrakennustyömaa Vantaalla. Koekohteen A osalta rakennetyyppi oli tutkimussuunnitelman mukaisesti maanvarainen betoni-laatta ja lattianpäällysteeksi tarkasteltavaan tilaan oli suunniteltu muovimattolattiapäällyste. Rakennetyyppi on esitetty kuvan 4.1 leikkauspiirustuksessa.

Koekohteen A mittausjärjestelyiden päätavoitteena oli tarkastella kuivatusjärjestelmällä tehostetun rakenteen kuivumista tiiviin lattianpäällysteen asentamisen jälkeen. Lisäksi tavoitteena oli verrata kuivatusjärjestelmällä varustetun betonilaatan kuivumista verrokki-laatan kuivumiseen.

Kuivatusjärjestelmä rakennettiin tutkimuksen mittausjärjestelyä varten ison varastohallin yhteydessä olevaan noin 50 m² laajuiseen toimistotilaan. Tarkasteltavan tilan valmistuminen ja betonilattiarakenteen kuivuminen eivät olleet työmaan etenemisen kannalta tahdistavia työvaiheita, joten koejärjestelyt voitiin määrittää kohtalaisen vapaasti ja rakenteen kuivumista hidastavien lattianpäällystekokeiden suorittaminen oli mahdollista.



Kuva 4.1. Koekohteen A tutkittavan rakenteen rakennetyyppi.

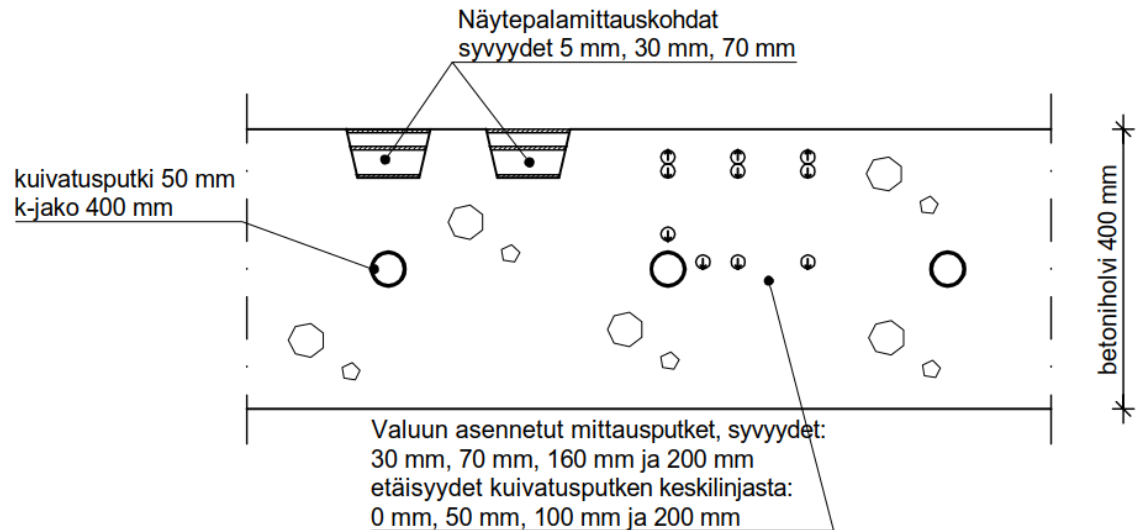
Kuivatusjärjestelmä on suunniteltu käytettäväksi ainoastaan rakennusaikana rakenteiden kuivattamiseen. Kuivatusjärjestelmä ja mittausputket tulpattiin ennen lopullisten lattianpäällystemateriaalien asentamista.

4.1.2 Koekohde B

Koekohde B on yhdistetty uudis- ja korjausrakennushanke Helsingin keskustassa. Kohteeseen on suunniteltu paksuja paikallavalurakenteena toteutettavia välipohjaholveja, joiden lattianpäällysteeksi on määritetty vanerialustainen puupölkylattia. Aikataulusuunnittelun yhteydessä paksujen betonivälipohjien kuivumisajan lyhentämiseksi on rakenteisiin suunniteltu kauttaaltaan ilmakiertoinen kuivatusjärjestelmä. Paksujen välipohjarakenteiden kuivuminen on työmaan etenemisen kannalta tahdistava työvaihe, joten kohteeseen ei voitu järjestää mahdollisesti rakenteen kuivumista hidastavia koejärjestelyitä kuten lattianpäällysteasennuksia.

Koekohteen B mittausjärjestelyiden päätavoitteena oli tarkastella kosteusjakaumien muodostumista paksuun rakenteeseen ennen lattianpäällysteen asentamista. Lisäksi tavoitteena oli tarkastella kuivatusjärjestelmän vaikutusta rakenteen kuivumiseen vertaamalla kuivumista ilman kosteudenkeruukanavistoa olevan verrokkialueen kuivumiseen.

Tässä tutkimuksessa tarkasteluun otettu rakenne on uudisrakennusosalla sijaitseva paikallavaluvälipohja, johon on asennettu kosteudenkeruukanavisto. Välipohjan pintakerrokseksi on suunniteltu vanerialustainen puupölkylattia, joka asennettiin vasta mittausjakson päätyttyä. Alapohjarakenne on esitetty kuvassa 4.2.



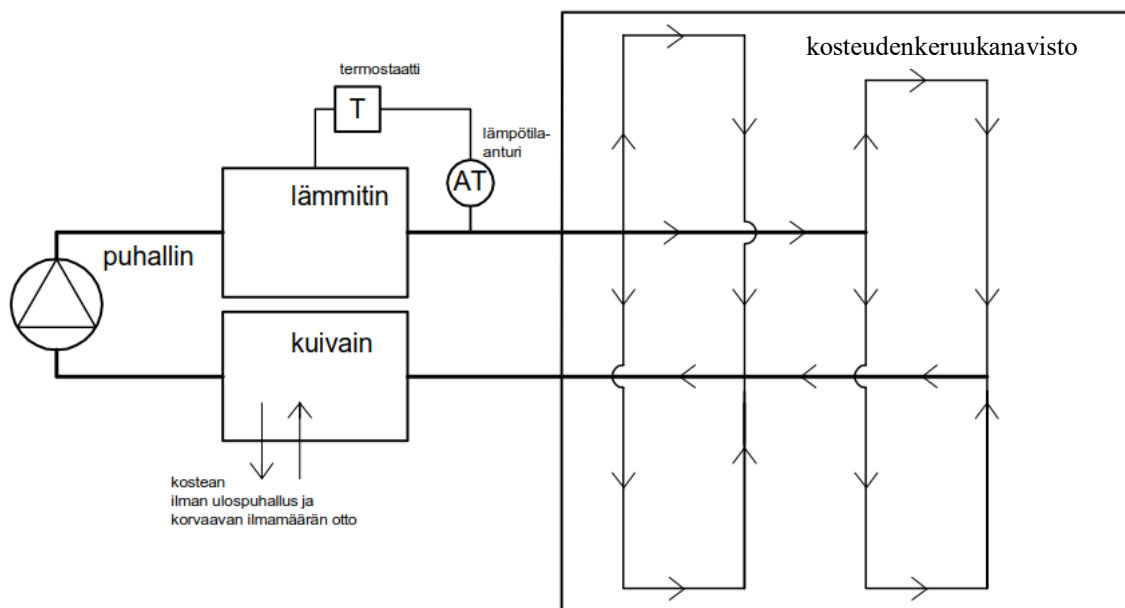
Kuva 4.2. Koekohteen B tarkasteltavan rakenteen rakennetyyppi.

Kuivatusjärjestelmä suunniteltiin käytettäväksi ainoastaan rakennusaikana rakenteiden kuivattamiseen. Kuivatusjärjestelmä ja mittausputket tulpattiin ennen lattiapäällystysmateriaalien asentamista.

4.2 Kuivatusjärjestelmä

4.2.1 Toimintaperiaate

Koekohteiden kuivatusjärjestelmänä käytettiin kappaleessa 2.2 esiteltyä kuivatus-/lämmitysjärjestelmää. Kuivatusjärjestelmän toimintaperiaate on sama molemmissa kohteissa. Toimintaperiaate on esitetty kuvan 4.3 toimintakaaviossa.



Kuva 4.3. Kuivausjärjestelmän toimintakaavio. Puhallin kierrättää sähkövastuksella lämmitettyä ilmaa kosteudenkeruukanavistossa. Adsorptiokuivain poistaa kiertävästä ilmasta vesihöyrymuodossa olevaa kosteutta. Lämmittimeltä kanavistoon lähtevä linja on menoilman runkokaanava ja kanavistosta kuivaimelle tuleva linja paluuilman runkokaanava. Runkolinjoista lähteviä piirejä kutsutaan kosteudenkeruupiireiksi ja piirit koostuvat kosteudenkeruuputkista sekä liitososista.

4.2.2 Kuivatuskalusto

Koekohteen A kuivatuslaitteistona käytettiin CTR 150XT adsorptiokuivainta, erillistä kanavapuhallinta sekä VEAB CV16 kanavalämmitintä. Kohteen runkolinjojen putkikoko oli 125 mm. Lisäksi rakennusliikkeellä oli mittausjakson loppupuolella tilassa 9 kW rakennuslämmitin lämmittämässä sisäilmaa.



Kuva 4.4. Koekohteen A kuivatuslaitteisto.

Koekohteen B tutkittavassa välipohjassa oli yhteensä 5 puhallin-kuivain-lämmitin yhdistelmää. Mittausjärjestelyt tehtiin yhden yhdistelmän palvelualueella. Laitteistona kohteessa oli CTR500XT adsorptiokuivain, erillinen kanavapuhallin sekä 9 kW lämmitin.

Kohteen runkolinjojen putkikoko oli 125 mm. Lisäksi rakennusliikkeellä oli tiloissa 50 kW TF 50HWI lämpöpuhaltimia.

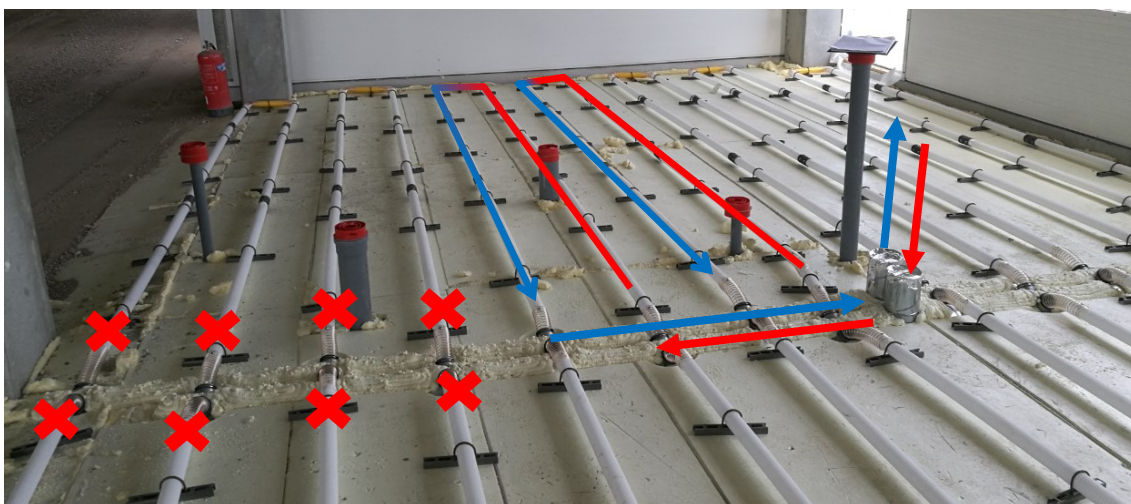
4.2.3 Kosteudenkeruukanavisto

Molemmissa kohteissa käytettiin järjestelmälle tyypillistä 400 mm putkijakoa koko tarkasteltavan rakenteen alalla ja kosteudenkeruupiirit asennettiin korkeussuunnassa betonivalun keskipaksuudelle. Molemmissa kohteissa tarkasteltavalla alueella oli yksi runkokanavapari. Runkokanavien halkaisija oli 125 mm ja kosteudenkeruuputken halkaisija 50 mm. Kosteudenkeruuputkien sijoittuminen poikkileikkauksessa on esitetty kuvissa 4.1 ja 4.2.

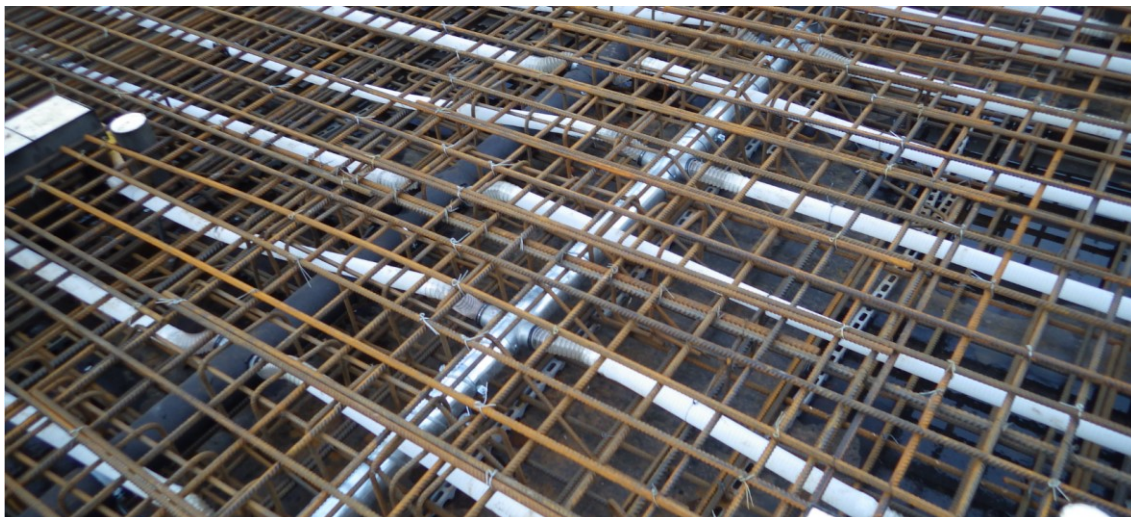
Koekohteessa A runkokanavat on upotettu uraamalla alapohjaeristeeseen. Runkokanavien yläosa on eristetty polyuretaanivaahdolla. Kosteudenkeruupiirit kiinnitettiin eristeeseen painettuihin U-teräksiin sidelangoilla. Osa piireistä tulpattiin jälkikäteen verrokialueen järjestämiseksi. Tulppaaminen tehtiin poraamalla reikä kosteudenkeruuputkeen ja pursottamalla putkeen polyuretaanivaahtoa.

Koekohteessa B runkokanavat ovat kokonaisuudessaan valun sisällä ja runkokanavien korkotaso on sama kuin kosteudenkeruupiireillä. Kohteen menoilman runkokanavat on eristetty liimattavalla umpisoluisella solukumieristeellä (Armaflex 9 mm). Paluuilman runkokanava on eristämätön. Kosteudenkeruupiirit kiinnitettiin sidelangoilla raudoitteisiin.

Valokuvissa 4.5 ja 4.6 on esitetty molempien kohteiden kosteudenkeruukanavistoa asennettuna ennen lattiavaluja. Koekohteiden kuivatussuunnitelmien tasopiirustukset on esitetty liitteissä 1 ja 2.



Kuva 4.5. Koekohteen A kosteudenkeruukanavistoa asennettuna. Kuvassa vasemmalla olevat piirit (punainen rastimerkintä) tulpattiin valun jälkeen polyuretaanivaahdolla. Värikköillä nuolimerkinnöillä on havainnollistettu kahden kosteudenkeruuspiirin ilmankiertoa. Punainen väri kuvaa menoilmaa ja sininen väri tuloilmaa.



Kuva 4.6. Koekohteen B kosteudenkeruukanavistoa asennettuna. Kanavisto on kokonaisuudessaan valun sisällä raudoitteiden välissä. Kosteudenkeruupiirit ja runkokanavat ovat molemmat rakenteen keskipaksuudella.

4.3 Mittausmenetelmät ja mittalaitteet

Koekohteessa A käytettiin betonin suhteellisen kosteuden päämittausmenetelmänä näytepalamittausta. Lisäksi päällystetyillä alueilla käytettiin viiltomittausmenetelmää liimakerroksen suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaamiseen. Menetelmäkuvaukset käytetyistä rakennekosteusmittausmenetelmistä on kuvattu luvussa 4.3.2 *kosteusmittausmenetelmät*.

Betonin ja liimakerroksen lisäksi mitattiin sisäilman- sekä meno- ja paluuilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta tallentavilla seurantamittalaitteilla. Sisäilman olosuhteiden osalta tallennusväli oli 20 tai 30 minuuttia. Meno- ja paluuilman mittauksissa tallennusvälinä käytettiin 5 minuuttia.

Ulkoilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja sademäärät mittausjakson ajalta saatiin ilmatieteen laitoksen tietokannasta (säähavaintoasema 13718, Helsinki-Vantaa lentoasema AWOS). Etäisyys havaintoasemalta koekohteelle on noin 1,9 km. Ilmatieteen laitoksen mittauksissa tallennusväli on 10 minuuttia.

Koekohteessa B käytettiin betonin suhteellisen kosteuden mittausmenetelminä näytepalamittausta sekä mittaputkimittausta valuun asennetuista mittausputkista. Mittaputkimenetelmällä saatiin mitattua myös rakenteen lämpötilaa. Menetelmäkuvaukset käytetyistä rakennekosteusmittauksista on kuvattu luvussa 3.3.2 *kosteusmittausmenetelmät*.

Betonin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden lisäksi mitattiin sisäilman- sekä meno- ja paluuilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta tallentavilla seurantamittalaitteilla. Sisäilman olosuhteiden osalta tallennusväli oli 30 minuuttia. Meno- ja paluuilman mittauksissa tallennusvälinä käytettiin 12 minuuttia.

Ulkoilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja sademäärät mittausjakson ajalta hankittiin ilmatieteen laitoksen tietokannasta (säähavaintoasema 100791, Helsinki Kaisaniemi). Etäisyys havaintoasemalta koekohteelle on noin 1,1 km. Ilmatieteen laitoksen mittauksissa tallennusväli on 10 minuuttia.

Käytetyt mittausmenetelmät ja mitatut suureet on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Mittausmenetelmät, mitatut suureet ja mittalaitteet.

Mittausmenetelmä	Mitattava suure / materiaali	Mittalaite / valmistajan ilmoittama tarkkuus	Huomioita
Näytepalamittaus	Suhteellinen kosteus RH [%] / betoni tai tasoite	Vaisala HMP44 anturi + HMI41 lukulaite / suhteellinen kosteus* ($\pm 2\%$, $0\ldots 90\%$ RH ja $\pm 3\%$, $90\ldots 100\%$ RH), lämpötila $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	Käytössä kohteessa A ja B
Porareikämittaus	Suhteellinen kosteus RH [%] ja lämpötila $^{\circ}\text{C}$ / betoni	Vaisala HMP44 anturi + HMI41 lukulaite / kts. edellinen	Käytössä kohteessa B
Viiltomittaus	Suhteellinen kosteus RH [%] ja lämpötila $^{\circ}\text{C}$ / kiinnitysliima	Vaisala HMP42 anturi + HMI41 lukulaite / suhteellinen kosteus ($\pm 2\%$, $0\ldots 90\%$ RH ja $\pm 3\%$, $90\ldots 100\%$ RH), lämpötila ($\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Käytössä kohteessa A
Olosuhdemittaus (tallentava)	Suhteellinen kosteus RH [%] ja lämpötila $^{\circ}\text{C}$ / huoneilma sekä meno- ja paluuilma	Testo 174 H loggeri / IOliving STR anturi + datankeruu android puhelin / suhteellinen kosteus ($\pm 1,8\%$ RH, $0\ldots 90\%$ RH, $\pm 2,3\%$ RH, $90\ldots 95\%$ RH, $\pm 3\%$ RH, $> 95\%$ RH), lämpötila ($\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Käytössä kohteissa A ja B
Säähavainnot	Suhteellinen kosteus RH [%], lämpötila $^{\circ}\text{C}$ ja sademäärä [mm/vrk] / ulkoilma	ei tiedossa	Mittaustulokset hankittu ilmatieteen laitoksen säähavaintodatasta

* Valmistajan ilmoittama tarkkuus on ilmoitettu 20°C lämpötilassa ja valmistajan suosittelemalla kalibrointivälillä, joka on vähintään 2 kertaa vuodessa.

Mittauspaikat ja -syvydet

4.3.1 Mittausalueet

Tarkasteltavat rakenteet jaettiin mittausalueisiin siten, että mittausalueen sisällä vallitsi kuivatusjärjestelyiltään ja rakenteeltaan vastaavat olosuhteet. Kuivatusjärjestelmällä kuivatetuilla mittausalueilla kosteudenkeruuputket muodostavat mittausalueille kuivatusolosuhteiltaan toisistaan poikkeavia kosteudenkeruuputkien suuntaisia vyöhykkeitä. Tästä syystä mittausalueiden sisältä on valittu mittausvyöhykkeitä eri vaakaetäisyyksiltä suhteessa kosteudenkeruuputkeen. Näistä mittausvyöhykkeistä käytetään nimitystä vyöhyke A...D, siten että vyöhyke A sijaitsee kosteudenkeruuputken kohdalla, vyöhyke B 50 mm vaakaetäisyydellä ja vyöhyke D kahden kosteudenkeruuputken keskilinjalla eli 200 mm

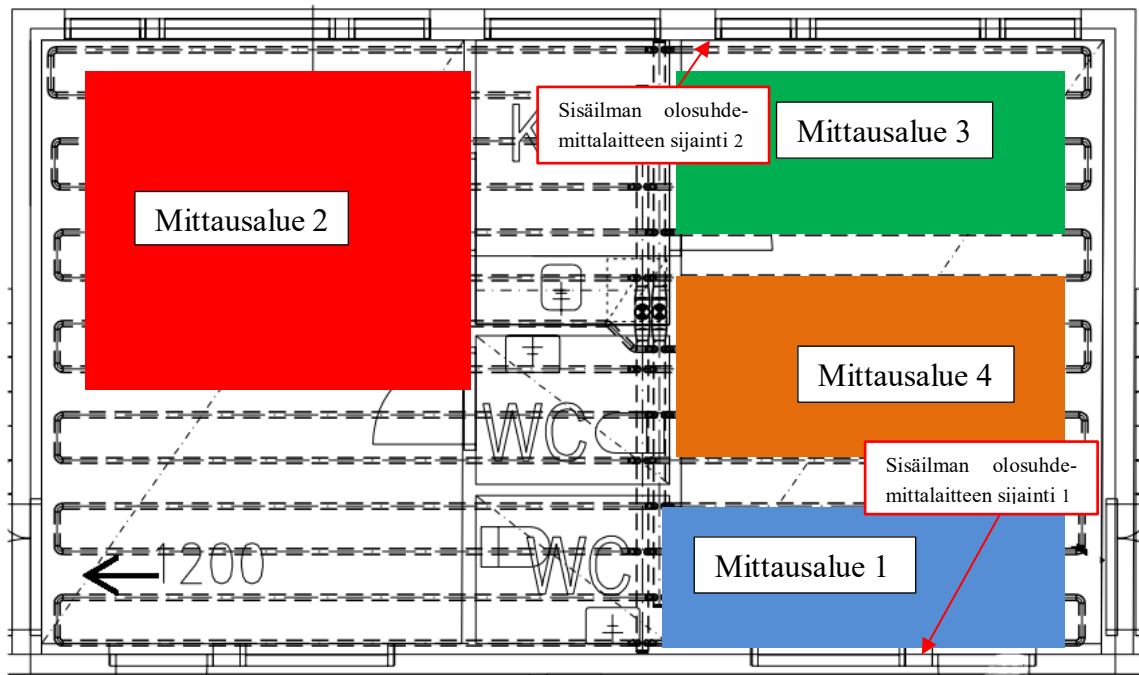
vaakaetäisyydellä putkesta. Kaikki mittausvyöhykkeet eivät olleet käytössä kaikilla mittausalueilla.

Mittauskohdat pyrittiin valitsemaan siten, että ne edustavat mahdollisimman kattavasti mittausalueen ja valitun mittausvyöhykkeen keskimääräistä kosteus- ja lämpöteknistä toimintaa. Tästä syystä mittauspisteitä ei valittu esimerkiksi laatan reuna-alueilta. Erityisesti koekohteessa B myös huonejaot ja talotekniikka määrittivät pitkälti mahdollisia mittapisteiden sijainteja.

Sisäilman kuivatusolosuhdemittalaitteiden sijoittelu pyrittiin tekemään siten, että ne edustaisivat mahdollisimman hyvin tilan keskimääräisiä olosuhteita. Mittalaitteiden sijoittelussa tuli huomioida myös työmaan toiminnot siten, että mittalaitteiden vaurioitumisen tai häviämisen riski olisi mahdollisimman vähäinen. Olosuhdemittalaitteiden sijainnit on esitetty kuvissa 4.7 ja 4.8.

Koekohteessa A tarkasteltava rakenne jaettiin neljään mittausalueeseen. Mittausalueelta 1 kosteudenkeruupiirit tulpattiin noin viikko kuivatuslaitteiston käynnistämisen jälkeen ja alueesta tehtiin niin sanottu verrokkialue. Kuivatusjärjestelmä oli käytössä muilla mittausalueilla. Mittausalueet 2 ja 3 päällystettiin eri ajankohtina kuivumista hidastavalla lattianpäällysteellä. Mittausalueita 1 ja 4 ei päällystetty mittausjakson aikana. Mittausalueiden sijainnit on esitetty kuvassa 4.7.

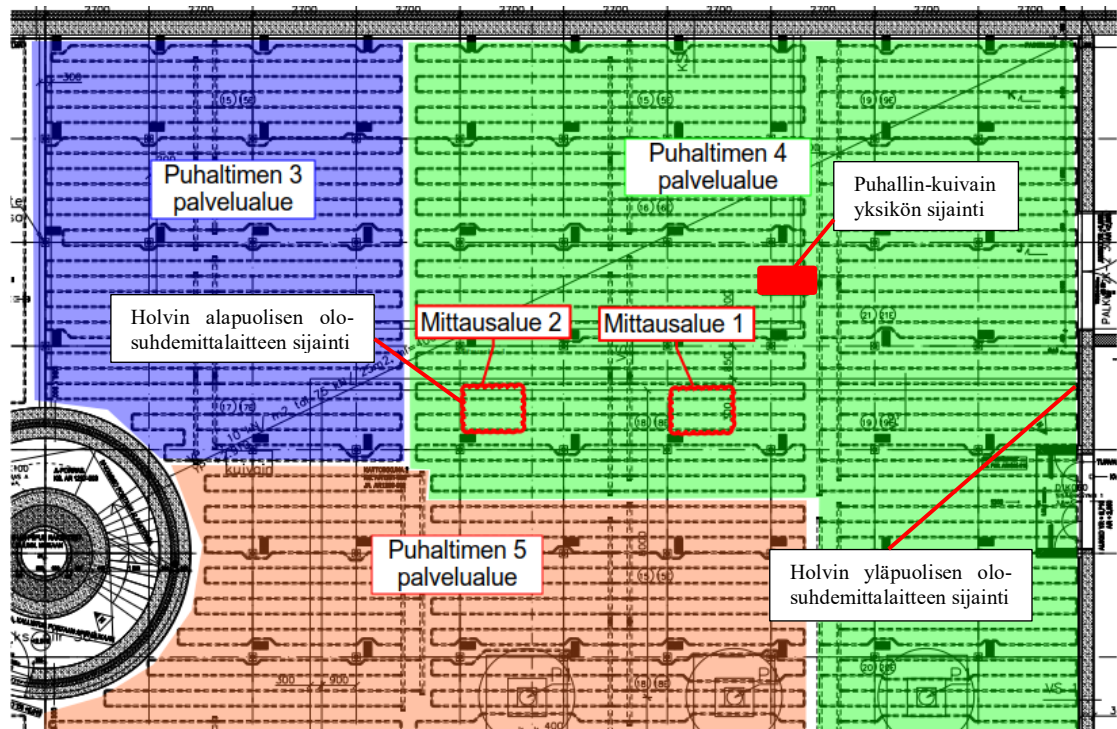
Mittausalueille 2 ja 3 tehtiin kosteusmittauksia sekä vyöhykkeeltä A että D. Mittausalueelle 1 ja 4 tehtiin kosteusmittauksia ainoastaan vyöhykkeelle D. Koekohteessa A kaikki kosteusmittaukset tehtiin näytepala- tai viiltomittausmenetelmällä, joten mittauskohdat valittiin uudestaan jokaisella mittauskerralla. Vyöhykkeitä on havainnollistettu mittaus-syvyyksien kuvauksen yhteydessä kuvassa 4.8.



Kuva 4.7. Koekohteen A mittausalueet ja kosteudenkeruupiirit. Mittauskohdat valittiin mittausalueilta siten, että ne edustavat haluttua vyöhykettä A tai D. Mittausalue 1 on tulpattu verrokkialue. Mittausalueet 3 ja 4 ovat päällystettyjä alueita. Mittausalue 4 on kosteudenkeruukanavistolla varustettu päällystämätön alue. Olosuhdemittalaite sijoitettiin alun perin sijaintiin 1, mutta työmaanhenkilökunta oli siirtänyt mittalaitteen 21.9.2017-12.10.2017 välisenä aikana sijaintiin 2.

Koekohteen B tarkasteltavalle alueelle tehtiin kaksi rinnakkaista saman kuivain-puhallinyhdistelmän palvelualueella sijaitsevaa mittausaluetta. Mittausalueet sijaitsivat kuivatusjärjestelyiltään, kuivumisolosuhteiltaan ja rakenteeltaan samanlaisilla alueilla. Mittausalueet on esitetty kuvassa 4.8.

Molemmilla mittausalueille tehtiin kosteusmittauksia mittaputkimenetelmällä kaikilla vyöhykkeillä A, B, C ja D ja näytepalamittauksia vyöhykkeelle D. Mittaputkimittaukset tehtiin jokaisella mittauskerralla samoista valuun asennetuista mittaputkista ja näytepalamittauskohdat valittiin erikseen jokaisella mittauskerralla. Vyöhykkeitä on havainnollistettu mittaussyvyyksien kuvauksen yhteydessä esitettyssä kuvassa (**Kuva**).

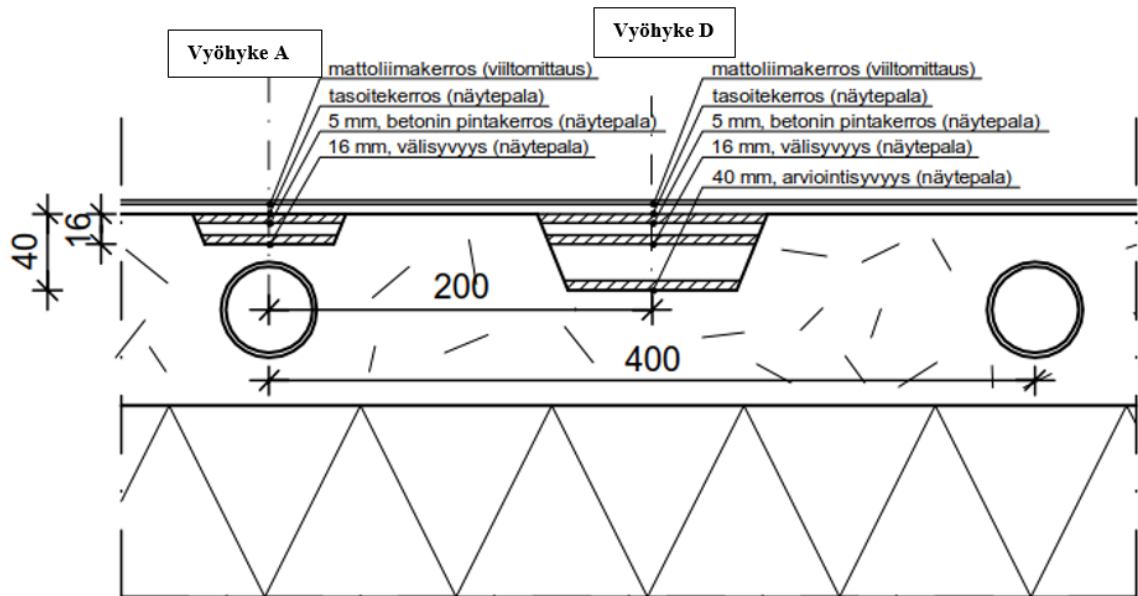


Kuva 4.8. Mittausalueiden sijainti kerroksen K2- osapohjapiirroksessa. Molemmat mittausalueet sijaitsevat kuivatusjärjestelmällä varustetulla alueella ja saman puhallin-kuivainyksikön palvelualueella.

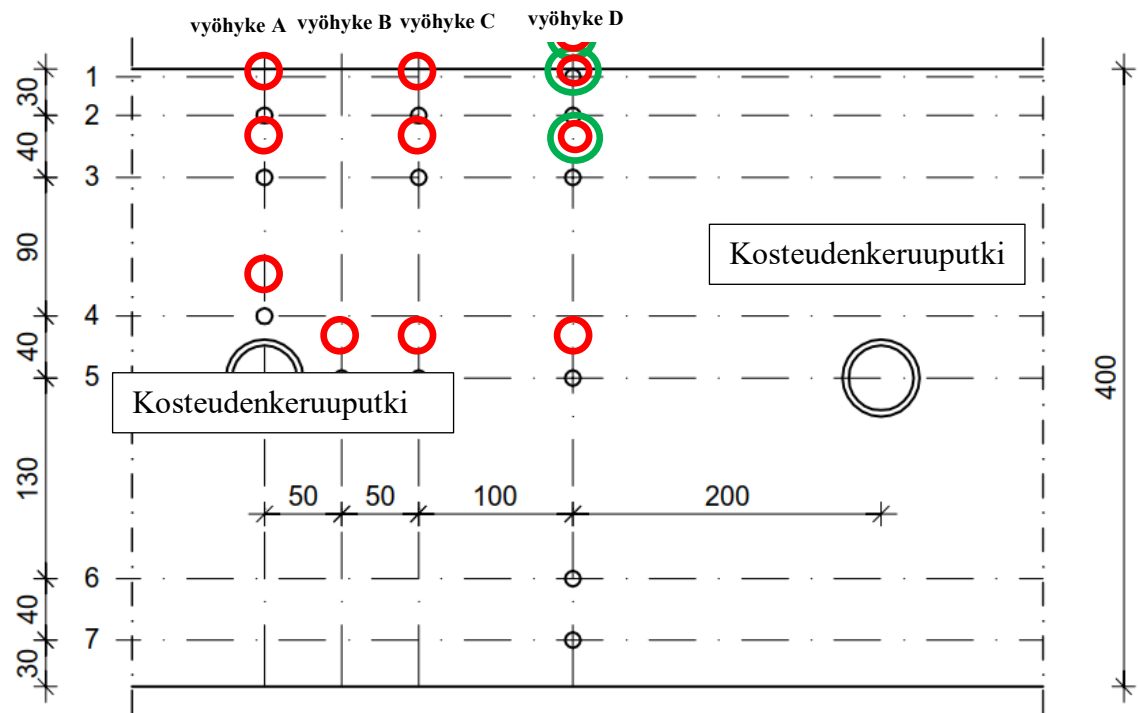
4.3.2 Mittaussyvydet- ja vaakaetäisyydet

Pääasialliset mittaussyvydet määritettiin rakennetyypin ja rakennepaksuuden mukaan julkaisussa (Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen 2007) esitetyllä tavalla (arviointisyvyys, välisyvyys ja betonin pinta). Edellä mainitut mittaussyvydet ovat koekohteen A alapohjarakenteelle (40 mm, 16 mm ja pintakerros) ja koekohteen B välipohjarakenteella (70 mm, 30 mm ja pintakerros). Lisäksi molemmissa kohteissa valittiin joitakin lisämittaussyvyksiä tarkemman kosteuskentän määrittämiseksi. Kaikki koekohteiden mittaussyvydet ja niiden sijainti rakenteen poikkileikkauksessa on esitetty kuvissa 4.9 ja 4.10.

Päämittausvyöhykkeenä käytettiin oletettavasti mittausalueen kosteinta aluetta eli kosteudenkeruuputkien keskivälillä sijaitsevaa vyöhykettä D lattialämmitetyillä rakenteille annetun suosituksen (Leivo et al. 2005) mukaisesti. Lisäksi molemmissa kohteissa valittiin joitakin lisämittaussyöhykkeitä tarkemman kosteuskentän määrittämiseksi. Kaikki koekohteiden mittaussyöhykkeet ja niiden sijainti rakenteen poikkileikkauksessa on esitetty kuvissa 4.9 ja 4.10.



Kuva 4.9. Koekohteen A mittaussyvyydet ja mittausvyöhykkeet. Kaikilla mittauserroilla ei mitattu kaikilta syvyyksiltä. Viiltomittaukset suoritettiin aina mattoliimakerroksesta ja molemmilta vyöhykkeiltä. Kaikissa näytepalamittauksissa otettiin näytepala syvyyksiltä 5 ja 16 mm. Vyöhykkeeltä A otettiin lisäksi aina arviointisyvyys 40 mm. Tasoitekerroksen kosteuspitoisuus mitattiin ainoastaan heti päällystyksen jälkeisellä mittauskerralla.



Kuva 4.10. Koekohteen B mittaussyvyydet ja mittausvyöhykkeet. Punaisella ympyröidyistä poikkileikkauspisteissä käytettiin mittaputkimittauksia ja vihreällä ympyröidyissä pisteissä näytepalamittauksia.

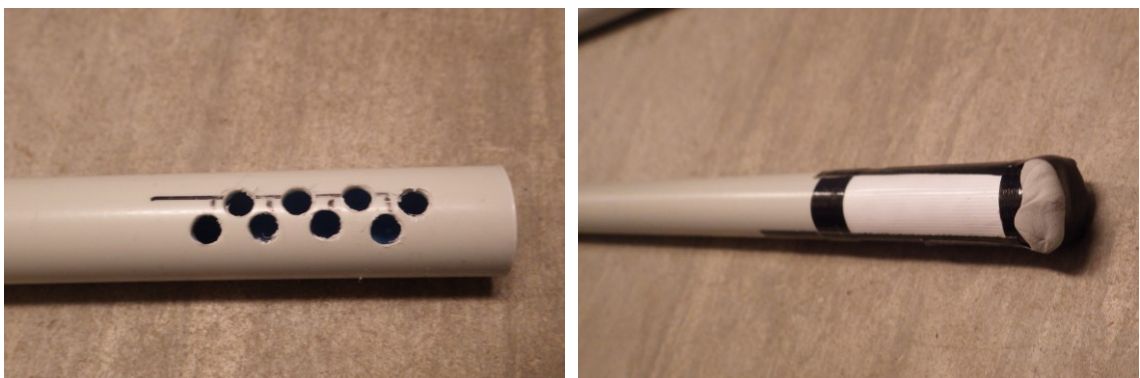
4.4 Koe- ja mittausjärjestelyt

4.4.1 Koe- ja mittausjärjestelyt ennen valua

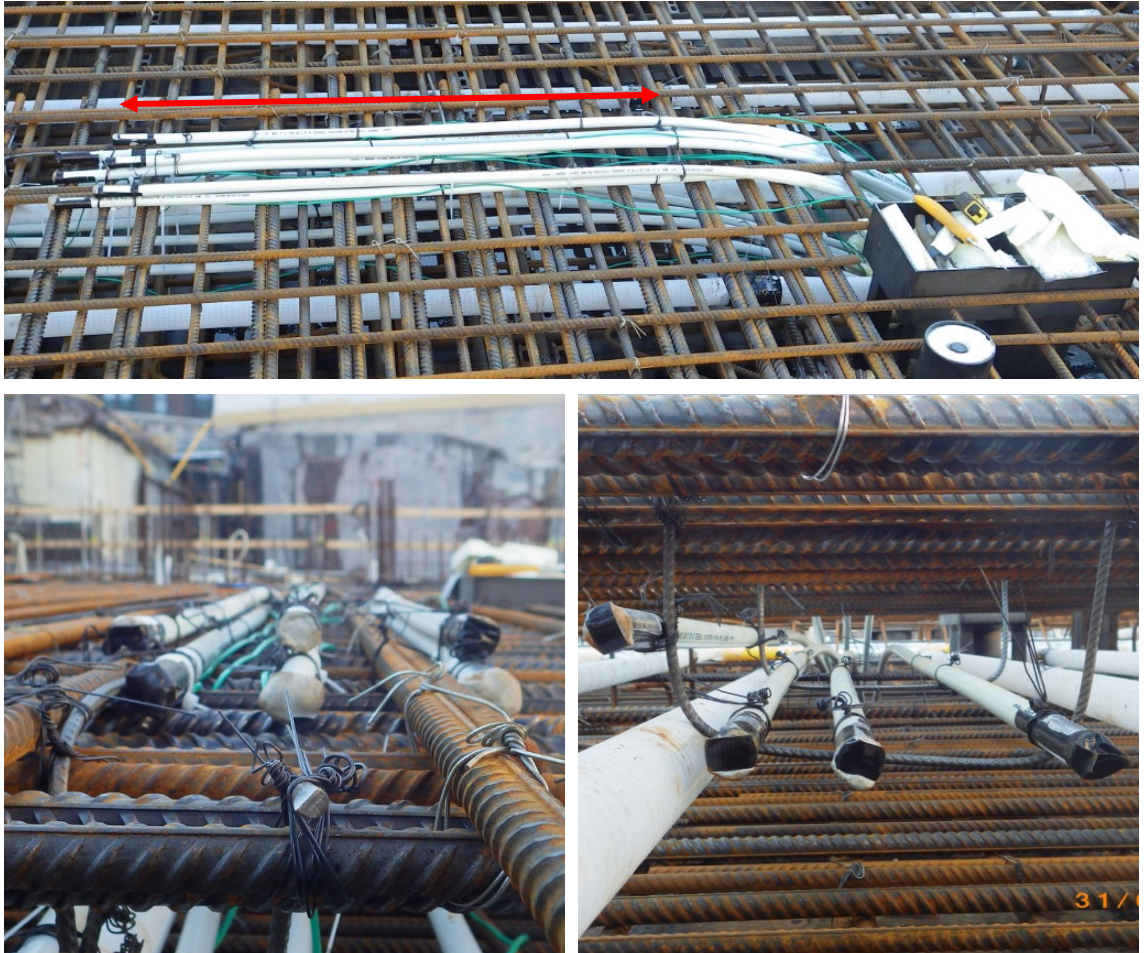
Koekohteessa A mittaukset tehtiin näytepala- ja viiltomittauksilla, joten mittaukset eivät vaatineet valuun asennettavia mittalaitteita tai muita esivalmisteluja kosteudenkeruukanaviston rakentamista lukuun ottamatta. Kuivatusjärjestelmän suunnittelun ja asentamisen teki Safedrying Oy:n Pasi Lehtimäki. Kuivatussuunnitelman tasopiirustus on esitetty liitteessä 1a. Kuvassa 4.5 on esitetty kosteudenkeruukanavistoa asennettuna ennen lattia-valua.

Koekohteessa B käytetty mittaputkimenetelmä edellytti ennakkovalmisteluja ennen valua. Tutkimuksen tekijä teki tarkasteltavan laatan mittausputkien asentamisen 30.3.-1.4.2017 ja vertailulaatan mittaputkien asennuksen 15.6.2017. Mittaputkia asennettiin kuivatusjärjestelmällä varustettuun välipohjaan yhteensä 20 kpl (10 kpl/mittapiste). Mittaputket kiinnitettiin sidelangoilla/nippusiteillä raudoitteisiin ja mittaputkille harjateräksestä työmaalla valmistettuihin telineisiin. Mittaputkina on käytetty ulkomitoilta 20 mm sähköputkea, jonka toinen pää on asennettu valun sisään mittaussyvyydelle ja toinen pää on taivutettu laatan alapintaan eristelevyllä rajattuun varauskoloon. Varauksolon kautta mittaputkiin saatiin mittausvaiheessa työnnettyä mittapäät.

Raudoitustyöt sekä kosteudenkeruukanaviston asennuksen teki AKR Betoni Oy. Kuivatuslaitteiston asentamisen teki Safedrying Oy:n Pasi Lehtimäki, joka myös ohjeisti urakoitsijaa kanaviston suunnitelmien mukaisessa asentamisessa. Tutkimuksen tekijä ei ollut paikalla kanaviston asennuksen aikana. Kanavisto oli asennettu ennen mittausputkien asentamista. Kuvissa 4.11 ja 4.12 on esitetty valokuvia mittausputkien valmisteluista ja asennuksesta sekä kosteudenkeruukanavistosta koekohteessa B ennen valua.



Kuva 4.11. Mittaputken valmistelu kohteessa B. Mittaputkeen porattiin yhdelle sivulle 8 kpl reikiä 5 mm poranterällä (vasen kuva). Reikien päälle asennettiin vesihöyrynläpäisevää valkoista teflon kalvoa mustan ilmastointiteipin avulla. Mittaputken pää suljettiin harmaalla (butyylinauha + valkotarra) tiivisteseoksella, jotta betonin kosteus pääsee tassaantumaan vain halutulta syvyydeltä porattujen reikien kautta putken ilmatilaan (oikea kuva). Mittaputket asennetaan vaakatasoon, jolloin betonin huokosverkostoon vesihöyryavoin pinta-ala on mahdollisimman tarkasti lähellä haluttua syvyyttä.



Kuva 4.12. Valokuvia mittapisteen MP1 mittaputkista ennen betonivalua. Mittaputket on pyritty asentamaan siten, että putki on vähintään 1 m matkalta (punainen kaksipäinen nuoli) mahdollisimman yhdensuuntainen kosteudenkeruuputken kanssa, jotta lämpötilaolosuhteet ovat lähellä mittaputken päätä. Mittapäiden asennuspää sijaitsee välipohjan alapintaan betonivaluun jätetyssä varauskolossa.

4.4.2 Lattiabetonointi ja jälkihoito

Koekohteessa A lattiabetonoinnin teki Primekss Oy. Valupäivä oli 10.7.2017. Tutkimuksen tekijä ei ollut paikalla valua tehtäessä. Tiedot betonointivaiheesta perustuvat betonointiurakoitsijan laadunvarmistusdokumentteihin ja pääurakoitsijan työmaainsinöörin haastatteluun. Betonointiin käytettiin Ruduksen valmisbetonia (normaalisti kovettuva rakennebetoni C25/30, maksimi raekoko 16 mm ja notkeusluokka S2, sementtilaatu Plussementti). Betonointiurakoitsija sekoitti työmaalla valmisbetoniin teräskuidut (HE75/50, 35kg/m^3) ja PrimeDC lisäaineen. Lisäaineen tekniset tiedot on esitetty liitteessä. Betonin vesi-sementtisuhde ei ole tiedossa. Betonin levityksen ja tärytyksen jälkeen betonilaatan pintaan on levitetty PrimeTop kuivasirote parantamaan pinnan kulutuskestävyyttä. Betonointiurakoitsijan mukaan kosteudenkeruuputket pyrkivät paikoitellen nousemaan betonin pintaan betonin tärytysvaiheessa. Betonointiurakoitsija oli lisännyt putkien kiinnityshakasia valun aikana.

Valuhetkellä vesikattorakenteet olivat pintakermiä ja pellityksiä vaille valmiit ja ulkoseinistä puuttui ikkunat ja ovet. Aukot oli peitetty suojamuoveilla. Periaatteessa tarkasteltava rakenne oli säältä suojassa. Jälkihoitotoimenpiteenä valun päälle levitettiin Bontec NW läpihengittävä geotekstiili haihtumiskuivumisen hidastamiseksi. Peite poistettiin 17.2.2017, joten jälkihoitoaika kesti 7 vrk.

Koekohteessa B betonointityön teki AKR betoni Oy. Mittausalueen alueen valupäivä oli 5.4.2017. Tutkimuksen tekijä ei ollut paikalla betonointitöiden aikaan. Välipohjaholvien betonin lujuusluokka on toteutusvaiheen rakennepiirustusten mukaan C30/37, käyttökätavoite 100 v ja rasitusluokka XC1. Käytetyn betonilaadun seossuhteet eivät ole tarkemmin tiedossa.

4.4.3 Kuivatuslaitteiston käyttö

Koekohteessa A kuivatuslaitteiston asennuksen teki Safedrying Oy:n Pasi Lehtimäki (23.8.2017) betonin ollessa 44 vrk ikäistä. Laitteiden asetukset säädettiin seuraavasti:

- Puhallin säädettiin vakioteholle siten, että kokonaisilmavirta oli noin 115 l/s, joka on noin 2,30 l/s kuivatettavaa lattianeliömetriä kohden. Kahden kosteudenkeruupiirin tulppaamisen jälkeen kokonaisilmamäärä laski siten, että kokonaisilmaviraksi jäi noin 100 l/s, joka on noin 2,80 l/s kuivatettavaa lattianeliömetriä kohden.
- Kanavalämmitin asetettiin toimimaan termostaatilla menoilmakanavaan asennettun lämpötila-anturin mukaan siten, että menoilman lämpötila pysyy noin 45 °C.
- Adsorptiokuivain asetettiin toimimaan jatkuvalla käytöllä. Valmistajan mukaan laitteen kosteudenerottelukyky (20 °C, 60% RH) on 12 l/vrk ja sähköteho 800W.

Kuivatuslaitteistolle otettiin sähkövirta lähimmältä työmaakeskukselta (etäisyys noin 30 m) jatkojohdolla. Jatkojohto merkittiin teipillä kuivatuslaitteiston johdoksi ja teippiin kirjoitettiin ”älä irrota” teksti. Myöhemmin kuivatuslaitteiston jatkojohto teipattiin työmaakeskukseen siten, että johtoa ei voinut irrottaa epähuomiossa. Merkinnöistä ja teippauksista huolimatta kuivatuslaitteiston virta oli katkaistu useita kertoja mittausjakson aikana.

Käytettävissä olleet meno- ja paluuilman mittaustuloksia tallentava loggeri (GrantSQ2040) oli kytketty toimimaan verkkovirran avulla. Tästä syystä loggeri lopetti mittaustulosten tallentamisen sähkövirran katkettua. Loggeri ei jatkanut automaattisesti tallentamista sähkövirran palauduttua. Kuivatuslaitteiston ja loggerin toiminta voitiin tarkastaa vain mittauskäyntien aikana, tästä johtuen meno- ja paluuilman olosuhdemittausdataan jäi katkoksia eikä kuivatuslaitteiston todellisia käyntiaikoja voitu määrittää täsmällisesti. Sähkökatkosten havaitsemiseksi menoilmakanavaan asennettiin etäluettava Ioliving olosuhdeloggeri 20.10.2017 alkaen. Merkittäviä sähkökatkoksia oli erityisesti mittausjakson alkupuolella. Loppuvaiheessa katkosten pituuden vähenivät ja sähkötkytettiin takaisin toimintaan rakennustyöntekijöiden toimesta.

Kuivatuslaitteisto purettiin mittausjakson päätyttyä tutkimuksen tekijän toimesta.

Koekohteessa B kuivatuslaitteiston (Puhallin 4) asennuksen ja käyttöönoton tarkasteltavalle alueelle teki Safedrying Oy:n Pasi Lehtimäki (9.8.2017) betonin ollessa 13 viikon ikäistä.

Laitteiden asetukset säädettiin seuraavasti:

- Puhallin säädettiin vakioteholle siten, että kokonaisilmavirta oli noin 240 l/s, joka on noin 0,81 l/s kuivatettavaa lattianeliömetriä kohden.
- Kanavalämmitin asetettiin toimimaan termostaatilla menoilmakanavaan asennetun lämpötila-anturin mukaan siten, että menoilman lämpötila pysyy noin (40 °C).
- Adsorptiokuivain asetettiin toimimaan jatkuvalla käytöllä. Valmistajan mukaan laitteen kosteudenerottelukyky (20 °C, 60% RH) on 12 l/vrk ja sähköteho 800W.

Meno- ja paluuilman olosuhteita seurattiin etäluettavilla IOliving STR antureilla. Mittalaitteiden tai kuivatuslaitteiston häiriöt nähtiin reaaliajassa pilvipalvelusta. Mittausdatasta havaitut kuivatuslaitteiston käyttökatkokset ja häiriöt on listattu alla:

- | | |
|-----------------|---|
| • 9.8 | laitteiston asennus |
| • 9.8 -18.8. | lämmitin ei pysy päällä (vikavirtasuojalauea, kosteutta liitinrasiassa) |
| • 13.8. - 18.8. | kuivain ei toiminnassa |
| • 19.8 - 21.8. | sähkökatkos ~ 41 h |
| • 25.8 - 1.9. | menoilman anturi hajonnut (anturi vaihdettiin) |
| • 14.9. - 15.9 | sähkökatkos ~ 7 h |
| • 20.9. | lyhyt sähkökatkos ~ 2 h |
| • 27.9. | lyhyt sähkökatkos ~ 3 h |
| • 20.10. | sähkökatkos ~ 13 h |
| • 23-25.10. | lyhyitä sähkökatkoksia yht. ~ 4 h |
| • 15-16.11. | sähkökatkoksia yht. ~ 10 h |
| • 21-22.11 | sähkökatkos ~ 13 h |
| • 19-20.12 | sähkökatkos ~ 16 h |

4.4.4 Lattianpäällysteasennukset

Lattianpäällysteasennuksia tehtiin koekohteeseen A. Lattianpäällysteet asennettiin tarkoituksellisesti siten, että alustabetonin kosteus ei vielä täyttänyt valmistajan edellyttämää suhteellisen kosteuden raja-arvoa arviointisyvyydellä. Lattianpäällysteasennusten ajankohdat määritettiin näytepalamittausten tulosten mukaan siten, että ensimmäisen lattianpäällysteasennuksen aikaan suhteellinen kosteus arviointisyvyydellä oli noin 95 % RH ja

toisen lattianpäällysteasennuksen aikaan noin 92 % RH. Kansallisen ohjeistuksen ja materiaalivalmistajan mukainen päällystettävyyden raja-arvo arviointisyvyydellä muovimattolle on 85 % RH.

Lattianpäällysteasennukset sekä niihin liittyvät pohjatyöt suoritti Heikkinen Yhtiöt Oy:n lattianpäällysteasentaja. Käytetyt materiaalit asennusjärjestyksessä on lueteltu alla:

- pohjuste Casco VD Super
- tasoite Schönox / Casco ZM
- liima Casco Universal
- lattianpäällyste Gerflor Cosmo 2 mm

Mittausalueen 2 pohjustus ja tasoitetyöt tehtiin 14.8.2017 ja muovimattoasennus 15.8.2018. Mittausalueen 3 pohjustus ja tasoitetyöt tehtiin 4.9.2017 ja muovimattoasennukset 5.9.2017.



Kuva 4.13. Valokuva koekohteesta A ensimmäisen lattianpäällysteasennuksen jälkeen. Päällystetty alue näkyy vasemmassa yläkulmassa kiiltävämpänä alueena. Tasoitettu alue näkyy hieman laajempaa mattapintaisena alueena. Tasoitetun alueen oikeassa reunassa näkyy hiukan sinistä pohjusteainetta.

Mittausjakson päätyttyä (5.1.2018) kiinnitysliiman, tasoitteen ja muovimaton kuntoa sekä tartuntaa arvioitiin aistinvaraisesti. Aistinvaraisten kokeiden suorittaminen ja havainnot on kuvattu mittauksien yhteydessä luvussa 5.1.6. Muovimatot, liimat, tasoitteet ja pohjusteet poistettiin kokonaisuudessaan mittausjakson ja aistinvaraisten kokeiden päätyttyä ennen käytönaikaisten lattianpäällysteiden asentamista.

4.5 Koekohteiden kosteudenhallinta

Koekohteiden kosteudenhallinta oli suunniteltu työmaaorganisaation toimesta ennen mittausjaksojen aloitusta. Työmaiden kanssa sovittiin, että suunnitellut työmaa-aikaiset kosteudenhallintatoimenpiteet tehdään työmaaorganisaation toimesta tutkimuksesta riippumattomasti ja tutkimuksessa tehtyjä kosteusmittauksia ei käytetä päällystettävyyden arviointiin. Työmaaorganisaatiot teettivät omat kosteusmittaukset ennen varsinaisiin lattianpäällystetöihin ryhtymistä.

Työmaakäyntien yhteydessä tehtiin havaintoja mittausalueiden kosteudenhallinnasta niiltä osin kuin niillä voi olla vaikutusta mittausjärjestelyihin tai kosteusmittaustuloksiin. Pääasiassa työmaakäynneillä havainnoitiin sääsuojauksen tasoa sekä sadevesilammikoiden ja muiden kosteusjälkien esiintymistä ja sijaintia mittausalueella. Mittausjaksolle osunut sateinen kesä ja syksy 2017 asettivat sääsuojaukselle haasteita.

4.5.1 Koekohde A

Työmaan tutkimuksen mittausjärjestelyiden valmistelun aikaan ilmoittaman aikataulun ja kosteudenhallintasuunnitelman mukaan:

- mittausalueen valu suoritetaan viikolla 22
- tarkasteltavan tilan betonilattia on säältä suojassa jo ennen valua
- betonilaatan kuivuminen mittausalueelta ei ole työmaan etenemisen kannalta tahdistava työvaihe, joten mittausalueelle ei vaadita tavanomaisesta olosuhdehallinnasta poikkeavia kosteudenhallintatoimenpiteitä.

Mittauskäyntien aikana tehdyt havainnot toteutuneesta aikataulusta, sääsuojauksen etenemisestä ja erityisesti veden lammikoitumisesta mittausalueille on esitetty alla. Havaintojen yhteydessä on lisäksi ilmoitettu sademäärä millimetreinä mittauspäivältä ja kahdelta edelliseltä vuorokaudelta. Sisäilman mitatut olosuhteet on esitetty mittaustulosten yhteydessä luvussa 5.1.2.

- Mittausalueen valu tehtiin viikolla 28. Valuhetkellä sääsuojana toimi yläpuoliset ontelolaatat ja muut kantavat betonirakenteet. Ikkuna- ja oviaukot oli peitetty muovilla.
- Mittauskäynti 1 (17.7.2017), mittauspäivänä sadetta, sademäärä 4,2 mm. Laatta kastunut sadevesistä kaikilta mittausalueilta. Sadevettä vuosi ontelolaattojen kantavien palkkien liitoskohdista sekä ikkuna- ja oviaukoista (kuva 4.14).
- Mittauskäynti 2 (1.8.2017), mittauspäivänä ja edeltävinä päivinä sadetta, sademäärä (12,3 mm). Lammikoitunutta vettä havaittiin mittausalueiden 1, 2 ja 3 alueella.
- Lattianpäällysteasennus 1 (14.8.2017 / 15.8.2017), edeltävinä päivinä sadetta, sademäärä 16,1 mm. Lammikoitunutta vettä päällystettäväksi suunnitellulla alueella. Tästä syystä päällystyö tehtiin suunnitellusta poikkeavalle alueelle.
- Mittauskäynti 3 (16.8.2017), kuiva sää, sademäärä 0,0 mm. Ei havaintoja lammikoituneesta vedestä. Vesikatolle on asennettu aluskermi.
- Kuivatuslaitteiston asennus (23.8.2017), kuiva sää, sademäärä 0,1 mm. Ei havaintoja lammikoituneesta vedestä. Tilaan asennettu tarkasteltavan kuivatusjärjestelmän lisäksi rakennuslämmitin rakennusurakoisijan toimesta. Rakennuslämmitin on sijoitettu siten, että se puhalttaa mittausalueelle 1.

- Mittauskäynti 4 (1.9.2017), sadetta mittauskäyntiä edeltävinä päivinä, sademäärä 4,9 mm. Mittausalueen 2 reunalle oli lammikoitunut pienelle alueelle vettä (kuva 4.15).
- Mittauskäynti 5 (21.9.2017), kevyttä sadetta mittauspäivänä ja edeltävinä päivinä sademäärä (2,7 mm). Mittausalueilla 1, 2, ja 3 havaittiin lammikoitunutta vettä pienillä alueilla (kuva 4.15).
- Mittauskäynti 6 (9.10.2017), voimakasta sadetta mittauspäivänä ja edeltävänä päivänä, sademäärä (36,2 mm). Mittausalueilla havaittiin pieniä määriä ikkunaliittymien kautta tullutta vettä. Ikkunat oli asennettu ja massattu ulkopuolelta, ikkunapellit puuttuivat.
- Mittauskäyntien 7, 8 ja 9 (10.11.2017 - 4.1.2018) aikana ei havaittu lammikoitunutta vettä tai kosteampia kohtia.

Seuraavissa valokuvin on esitetty koekohteesta A tehtyjä havaintoja.



Kuva 4.14. Vesivuotojälkiä yläpohjaliittymistä mittauskäynnillä 1. Lattia on lähes kauttaaltaan märkä vuotovesistä. Kuva on otettu tarkasteltavan alueen viereisestä toimistotilasta, jossa oli vastaavat rakenteet ja vuotopaikat kuin tarkasteltavassa tilassa. Lattialla on vielä jälkihoitopeite. Jälkihoitopeite poistettiin kuvan ottamisen jälkeen kuvan tilasta sekä mitattavasti tilasta.



Kuva 4.15. Mittauskäynneillä 4 ja 5 tehtyjä havaintoja. Vettä lammikoitunut useille pienille alueille ja edellisten mittauskertojen näytepalamittauskuopat vesitäytteisiä.

4.5.2 Koekohde B

Koekohteessa B mittausjärjestelyiden suunnittelun aikaan käytössä olleen rakennusvaiheikataulun ja kosteudenhallintasuunnitelman mukaan

- mittausalueen valu suoritetaan viikolla 13
- valutyöt tehdään ilman sääsuojaa ylemmän ja kerroksen valumuotit ja valut toimivat valmistuessaan sääsuojana
- mittausalueen yläpuoliset muotit ovat valmiina viikolla 27 ja valut tehdään viikolla 29
- tutkimuksessa tarkasteltavan välipohjan kuivattamisen tiedettiin olevan rakentamisaikataulun kannalta tahdistava työvaihe, tästä syystä rakenteeseen oli suunniteltu kuivatusjärjestelmä
 - kuivatuslaitteiston käynnistämisaikankohdasta ei oltu vielä päätetty, mutta tavoitteena oli käynnistää kuivatus ja seurantamittaukset mahdollisimman pian valun jälkeen.

Koekohteessa B tehdyt havainnot sääsuojauksen etenemisestä ja veden lammikoitumisesta on esitetty alla. Havaintojen yhteydessä on lisäksi ilmoitettu sademäärä millimetreinä mittauspäivältä ja kahdelta edelliseltä vuorokaudelta. Sisäilman mitatut olosuhteet on esitetty mittaustulosten yhteydessä luvussa 5.1.2.

- Mittausalueen valu tehtiin viikolla 23 ilman sääsuojaa (kuva 4.16).
- Mittauskäynti 1 (17.5.2017), kuiva sää, kaikki rakenteet kuivia, sademäärä 1,6 mm. Tarkasteltava rakenne täysin ilman sääsuojaa.
- Mittauskäynti 2 (15.6.2017), kuiva sää, kaikki rakenteet kuivia, sademäärä 0,6 mm. Tarkasteltava rakenne täysin ilman sääsuojaa.
- Mittauskäynti 3 (14.7.2017 / 17.7.2017), mittauspäivää edeltävänä päivänä sadetta, sademäärä 4,5 mm / mittauspäivänä sadetta, sademäärä 2,8 mm. Tutkittavalla välipohjalla laajoilla alueilla 10...30 mm paksuinen vesipatja, Mittauskohdassa lammikoituminen oli vain osittaista (kuva 4.17). Tarkasteltavan välipohjaholvin läpiviennit ja epätiivetyshkohdat ummistettu vesitiiviisti kumibitumikermipaikoilla siten, että tarkasteltava holvi toimii alempien kerrosten sääsuojana. Tarkasteltavalla rakenteella osittainen sääsuoja yläpohjan valumuoteista. Tutkittavan välipohjan alapuolella työmaalämmitys päällä.
- Mittauskäynti 4 (13.10.2017), edellisenä päivänä runsasta sadetta sademäärä 22,8 mm. Lähes koko tutkittavan välipohjan alueella 10...30 mm paksuinen vesipatja (näytepalamittauksia ei voitu suorittaa). Kumibitumikermipaikat estävät veden poistumisen alempiin kerroksiin (kuva 4.17). Vesi valuu hiljalleen porraskäytävään, josta sitä pumpataan pois. Ylemmän kerroksen valut + muotit toimivat mittausalueen sääsuojana, mutta vesi pääsee mittausalueen holville muottien saumoista ja reuna-alueilta. Sekä tutkittavan välipohjan ylä- että alapuolella työmaalämmitys päällä.
- Mittauskäynti 5 (9.11.2017), mittauspäivänä sadetta, sademäärä 5,1 mm. Mitattavalla holvilla paikoitellen lammikoitunutta vettä. Mittauskohdalla kuivaa. Yläpuolinen holvi valettu. Välipohjan kuivatuslaitteisto käynnistetty mittausalueilta.
- Mittauskäynti 6 (8.12.2017), mittauspäivänä ja edellisenä päivänä runsasta sadetta, sademäärä 14,8 mm. Mitattavalla holvilla paikoitellen lammikoitunutta vettä. Vettä on myös kuivatuslaitteiston menokanavan ympärillä sekä mittausalueen läheisyydessä. Kuivatuslaitteiston haitariputki rikki (kuva 4.18).
- Mittauskäynti 7 (4.1.2018), mittauspäivänä sadetta, sademäärä 3,6 mm, Mitattavalla holvilla paikoitellen lammikoitunutta vettä. Mittausalueen reunassa vesilammikko. Yläpuolisen holvin vesieristys tehty.

Seuraavissa valokuvissa on esitetty koekohteesta B tehtyjä kosteudenhallintaan liittyviä havaintoja.



Kuva 4.16. Valu tehtiin ilman sääsuojaa. Valokuva on otettu valua edeltävällä viikolla.



Kuva 4.17. Mittauskäynneillä 3 (ylemmät kuvat) ja 4 (alemmat kuvat) tehtyjä havaintoja. Tarkasteltavalla holvilla havaittiin 10...30 mm paksuinen vesipatja laajoilla alueilla. vasemmalla alhaalla näkyy bitumikermilappu, joilla on hitsattu välipohjan läpiviennit vesitiiviiksi. Tutkittavan välipohjan molemmin puolin oli rakennuspuhaltimia lämmittämässä tiloja.



Kuva 4.18. Mittauskäynnillä 6 tehtyjä havaintoja. Tutkittavalla välipohjalla on edelleen vesilammikoita. Kosteudenkeruu kanavistoon johtava haitariputki on revennyt ja runko-kanavan pohjalla näkyy vettä.

4.6 Mittausten suorittaminen

4.6.1 Koekohde A

Koekohteeseen A tehtiin seuraavia mittauksia:

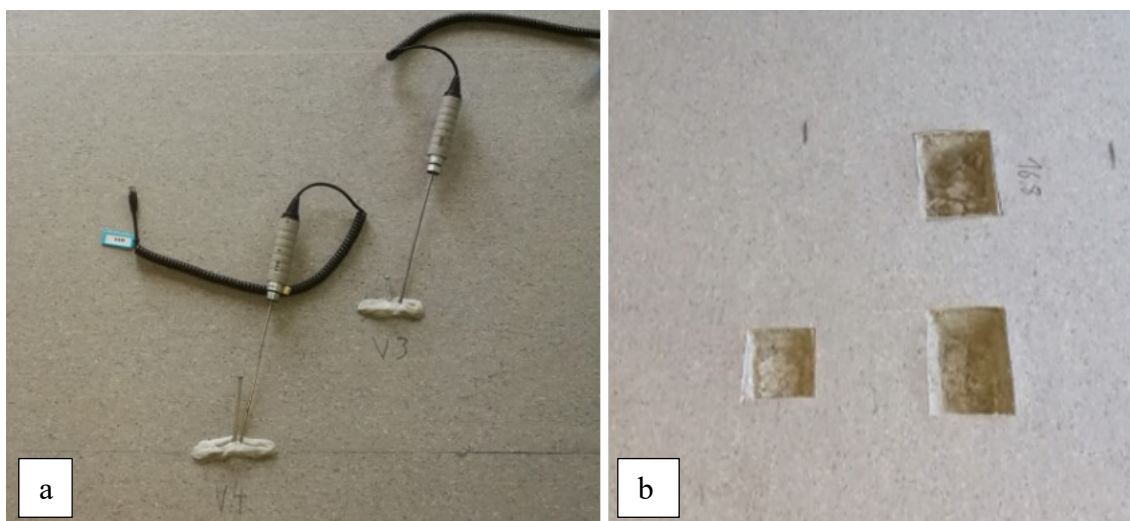
- Betonialapohjan suhteellista kosteutta eri syvyyksiltä ja kaikilta mittausalueilta mitattiin näytepalamittausten avulla.
- Mattoliimakerroksen kosteuspitoisuutta ja lämpötilaa päällystetyiltä alueilta (mittausalue 2 ja mittausalue 3) mitattiin viiltomittauksilla.
- Meno- ja paluuilman lämpötilaa- ja suhteellista kosteutta seurattiin tallentavilla seurantamittalaitteilla
- Sisäilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin tallentavalla seurantamittalaitteella
- Ulkoilman lämpötila- ja suhteellinen kosteus mittausjakson ajalta (Helsinki-Vantaan lentoaseman säähavaintoasemalta) saatiin ilmatieteen laitoksen ilmastodatapalvelusta.

Näytepalamittaukset aloitettiin välittömästi jälkihoitopeitteen poistamisen jälkeen 7 vrk kuluttua valusta. Viiltomittaukset aloitettiin ensimmäisten lattianpäällystetöiden jälkeen. Mittauskäyntejä tehtiin yhteensä yhdeksän kuuden kuukauden mittausjakson aikana. Kaikki koekohteeseen A tehdyt näytepala- ja viiltomittaukset on taulukoitu mittausalueittain ja mittauspäivämäärien mukaan taulukkoon 4.2. Valokuvia koekohteeseen tehdystä viiltomittauksista on esitetty kuvassa 4.19.

Sisäilman sekä meno- että paluuilman olosuhdemittalaitteet asennettiin 1.9.2017. Mittalaitteet tallensivat lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittausjakson loppuun saakka. Meno- ja paluuilman mittausjaksoihin tuli merkittäviä katkoksia sähkönsaannin katkok- sista johtuen (kts. kohta 4.4.3 Kuivatuslaitteiston käyttö). Sisäilman olosuhdemittalait- teen sijainti valittiin aluksi mahdollisimman kauaksi ikkuna-aukoista edustavampien tu- losten saamiseksi. Mittalaitetta oli siirretty ikkunan lähelle rakennustöiden tieltä 4.10.2017. Olosuhdemittausten mittausjaksot on esitetty alla olevassa taulukossa (**Tau- lukko**).

Taulukko 4.2. Koekohteen A näytepala- ja viiltomittausten ajankohdat mittausalueittain sekä seurantamittausten mittausjaksot. Taulukossa yksittäisen kosteusmittauksen tunnuksen ensimmäinen merkki kertoo mittaustavan (N=näytepalamittaus, V=viiltomittaus), toinen merkki kertoo mittausalueen numeron ja kolmas mittausvyöhykkeen. Taulukon lukemisen selkeyttämiseksi viiltomittaukset on korostettu vihreällä värillä. Kohteeseen tehtiin yhteensä 9 mittauskäyntiä sisältäen 37 näytepalamittausta ja 22 viiltomittausta.

Mittaus- ajankohta	Mittausalue 1 (verrokki)	Mittausalue 2				Mittausalue 3				Mittausalue 4	Olosuhdemittaus		
											ulko	sisä	putk.
17.7.2017 (7 vrk)	N1d										ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kostuden mittausjakso		
1.8.2017 (22 vrk)	N1d	N2d				N3d				N4d			
16.8.2017 (37 vrk)	N1d	N2d											
1.9.2017 (53 vrk)	N1d	N2d	V2d	N2a	V2a	N3d				N4d		sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kostuden mittausjakso	meno- ja paluuilman lämpötilan ja suhteel- lisen kostuden mittausjakso
20.9.2017 (72 vrk)	N1d	N2d	V2d	N2a	V2a	N3d	V3d	N3a	V3a				
12.10.2017 (94 vrk)	N1d	N2d	V2d	N2a	V2a	N3d	V3d	N3a	V3a	N4d			
10.11.2017 (123 vrk)	N1d	N2d	V2d	N2a	V2a	N3d	V3d	N3a	V3a	N4d			
7.12.2017 (150 vrk)	N1d	N2d	V2d	N2a	V2a	N3d	V3d	N3a	V3a	N4d			
4.1.2018 (178 vrk)	N1d	N2d	V2d	N2a	V2a	N3d	V3d	N3a	V3a	N4d			



Kuva 4.19. Kuvia kosteusmittausten suorittamisesta koekohteessa A. Kuvassa a viilto-mittauksia kohteessa A. Muovimattoon tehtiin viilto ja kosteusmittapää (Vaisala HMP42) työnnettiin muovimaton alle ja tiivistettiin butyylinauha + valkotarra kitillä vesihöyrytiiviisti muovimattoon. Mittapään annettiin tasaantua 15...20 minuuttia ennen lukemien ottoa. Kuvassa b näytepalamittapisteitä koekohteessa A. Suuremmat kuopat ovat kosteudenkeruuputkien väliin (vyöhyke d) tehtyjä mittauksia ja pienempi ja matalampi kuoppa on kosteudenkeruuputken kohdalle (vyöhyke a) tehty mittapiste. Näytepalamittauksen suoritus on kuvattu luvussa 3.2.2 kosteusmittausmenetelmät.

4.6.2 Koekohde B

Koekohteeseen B tehtiin seuraavia mittauksia:

- Betonivälipohjan suhteellista kosteutta eri syvyyksiltä mitattiin molemmilta mittausalueilta näytepalamittauksilla
- Betonivälipohjan suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin yksittäisellä porareikämittauksella
- Betonivälipohjan lämpötilaa- ja suhteellista kosteutta mitattiin mittaputkimittauksilla useammilta syvyyksiltä ja vaakaetäisyyksiltä kosteudenkeruuputkesta
- Meno- ja paluuilman lämpötilaa- ja suhteellista kosteutta seurattiin etäluettavilla tallentavilla seurantamittalaitteilla
- Sisäilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin tallentavalla seurantamittalaitteella
- Ulkoilman lämpötila- ja suhteellinen kosteus mittausjakson ajalta (Kaisaniemen säähavaintoasemalta) saatiin ilmatieteen laitoksen ilmastodatapalvelusta.

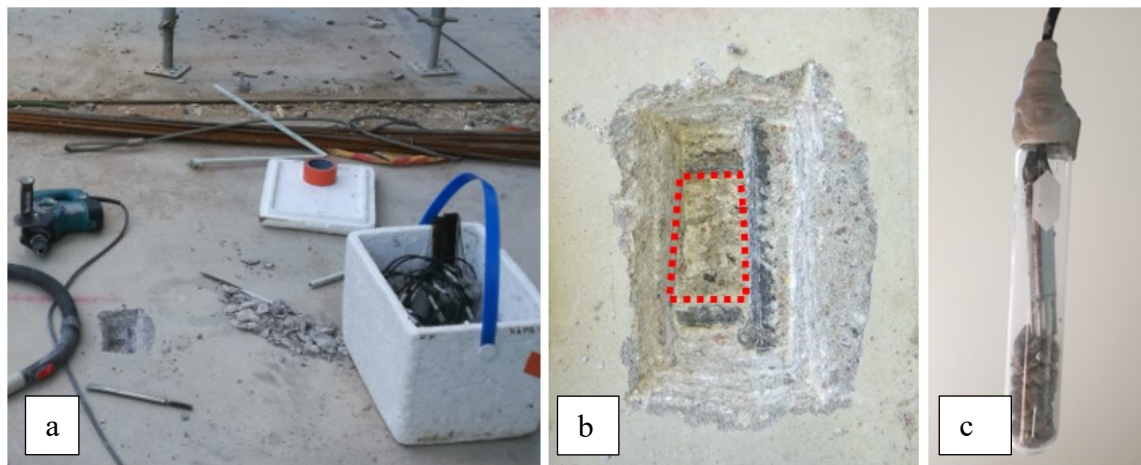
Ensimmäiset näytepalamittaukset mittausalueelle tehtiin 17.5.2017 noin 6 viikkoa valun jälkeen. Ensimmäiset mittaputkimittaukset tehtiin 15.6.2017 noin 10 viikkoa valusta. Näytepala- ja mittaputkimittauksia jatkettiin mittausjakson loppuun saakka. Koekohteen B mittauskertoja vähennettiin alkuperäisestä suunnitelmasta (yksi mittauskäynti/kk), koska tarkasteltavan rakenteen yläpinta oli sadevesille alttiina lähes koko mittausjakson

ajan. Kaikkia näytepalamittauksia suunniteltuja näytepalamittauksia ei voitu suorittaa tutkittavan välipohjan päällä olleen veden takia. Mittauskäyntejä tehtiin yhteensä seitsemän yhdeksän kuukauden mittausjakson aikana. Kaikki koekohteeseen B tehdyt näytepala- ja mittaputkimittaukset on taulukoitu mittausalueittain ja mittauspäivämäärien mukaan taulukkoon 4.3. Valokuvia koekohteeseen tehdyistä kosteusmittauksista on esitetty kuvissa 4.20 ja 4.21.

Sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittalaitteet tutkittavan välipohjan alapuoliseen tilaan asennettiin 15.6.2017. Mittausteknisistä syistä tallennettuja mittautuloksia saatiin kuitenkin vasta 20.8.2017 alkaen. Meno- ja paluuilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittalaitteet asennettiin 9.8.2017. Myös olosuhdemittausten mittausjaksot on esitetty taulukossa 4.4.

Taulukko 4.3. Koekohteeseen B tehtyjen näytepala- ja mittaputkimittauksien sekä seurantamittausten ajankohdat. Kohteeseen tehtiin yhteensä 7 mittauskäyntiä sisältäen 9 näytepalamittausa ja 11 mittaputkimittausa.

Mittausajankohta	Mittausalue 1		Mittausalue 2		Olosuhdemittaukset		
					sisä	ulko	kuiv. putki
17.5.2017 (42 vrk)			N2d			ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittausjakso	
15.6.2017 (71 vrk)	N1d	MP1a...d					
17.7.2017 (103 vrk)	N1d	MP1a...d	N2d	MP2a...d	alapuolisen tilan sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittausjakso		meno- ja paluuilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittausjakso
13.10.2017 (191 vrk)		MP1a...d		MP2a...d			
9.11.2017 (218 vrk)	N1d	MP1a...d	N2d	MP2a...d			
8.12.2017 (248 vrk)		MP1a...d	N2d	MP2a...d			
5.1.2018 (275 vrk)	N1d	MP1a...d	N2d	MP2a...d			



Kuva 4.20. Valokuvia näytepalamittauksesta koekohteesta B. Kuvassa (a) näytepalamittauskuoppa, piikkauskalustoa, sekä kylmälaukku näytepalojen säilytystä varten. Kuvassa (b) mittauskohta näytepalojen piikkauksen jälkeen. Mittauskohdassa tuli raudoitteet vastaan ennen arviointisyyvyyttä. Arviointisyyvyydelle (70 mm) päästiin punaisella katkovivalla rajatulla alueella. Kuvassa (c) arviointisyyvyydeltä otettuja betonimuruja ja mittapää tiivistettynä koeputkeen.



Kuva 4.21. Betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittausta mittaputkista koekohteessa B. Mittaputkien tiivistyskitti poistettiin varauskoloista ja mittapäät (Vaisala HMP44) työnnettiin mittaputkien mittauspäähän asti (2 m) ja putken pää tiivistettiin mittapään johtoon kitillä. Mittapäiden ja mittaputkien annettiin tasaantua vähintään neljä tuntia mittapäiden asentamisen jälkeen ennen lukemien ottoa. Oikeassa kuvassa olosuhdeloggeri (Testo 174H) asennettuna varauskoloon tarkasteltavan rakenteen alapuolelle. Kuvassa näkyvät vihreät langat ja teipillä oranssilla teipillä peitetty mittalaite ovat betonin lämpötilamittauksiin suunniteltuja termolankoja ja termolankaloggeri. Termolankamittauksia ei lopulta käytetty tutkimuksessa.

4.7 Koejärjestelyiden kokemukset ja työmailta saatu palaute järjestelmästä

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli kerätä käyttökokemusta kuivatuslaitteiston käytöstä suuremmilta työmailta järjestelmän jatkokehitystä varten. Koekohteessa A kuivatuslaitteiston asennuksen teki järjestelmätoimittaja ja koekohteessa B raudoitusurakoitsija. Seuraavissa kappaleissa on esitetty kohteittain saatua palautetta ja tutkimuksen tekijän tekemiä havaintoja järjestelmän teknisestä suoriutumisesta.

Koekohde A

Koekohteen A tarkasteltava rakenne valettiin kuitubetonilla, joten kosteudenkeruuputkia ei voitu kiinnittää raudoitusverkkoon kuten tavanomaisesti. Putkien kiinnityksessä käytettiin valukorokkeita putken alla, ja sileästä 6 mm terästangosta valmistettuja U-hakasia

putken ympärillä. Hakaset painettiin eristeeseen sakarat alaspäin siten, että kosteudenkeruuputki puristui valukoroketta vasten. Hakasia asennettiin noin yhden metrin jaolla. Hakaset on nähtävissä kuvassa 4.5. Betonointiurakoitsijan mukaan putket pyrkivät paikoitellen nousemaan valun aikana valun pintaa kohden. Betonointiurakoitsija oli valun aikana lisännyt hakasia. Urakoitsija antoi kehitysehdotuksen, että hakaset voitaisiin valmistaa harjateräksestä, jolloin yksittäiselle hakaselle saadaan suurempi ulosvetolujuus. Urakoitsijan mukaan hakasten jakoa tulisi tihentää, ettei kosteudenkeruuputki pääse taipumaan ylöspäin hakasten väliltä.

Kohteessa betonilaatan rakennepaksuus (100 mm) on kriittisen ohut kuivatusjärjestelmän asentamiselle. Pääurakoitsija epäili valun jälkeen, että rakenteeseen voi syntyä halkeamia kosteudenkeruuputkien kohdalle, koska rakenne on heikompi kanavien kohdalla. Halkeamien syntymistä seurattiin aistinvaraisesti tarkastelujakson ajan. Tilaan havaittiin syntyvän muutamia paikallisia halkeamia, mutta ne eivät sijainneet kosteudenkeruuputkien suuntaisesti.

Suurimmat haasteet kuivatuslaitteiston käytön suhteen havaittiin järjestelmän sähkönsyötössä. Rakennustyömaa oli pinta-alaltaan laaja ja työmaakeskuksia oli harvassa. Tästä syystä kuivatuslaitteistolle johtava jatkojohto oli pitkä ja kulki kulkuväylän poikki. Jatkojohto otettiin työmaalla toistuvasti muuhun käyttöön teippimerkinnöistä huolimatta, eikä jatkojohtoa oltu useimmiten kytketty takaisin kuivatuslaitteistoon. Tilanne parani tarkastelujakson edetessä, kun pääurakoitsijan työnjohto ohjeisti työmaahenkilökuntaa olemaan irrottamatta kuivatuslaitteiston johtoa. Järjestelmätoimittaja asensi etäluettavan lämpötila-anturin menoilmankanavaan tarkastelujakson puolivälissä, jotta kuivatusjärjestelmän sähkökatkokset voidaan havaita muulloinkin kuin työmaakäyntien ajalta. Pääurakoitsijan kehitysehdotus oli, että vastaavissa kohteissa kuivatuslaitteistolle tulisi vetää kiinteät sähköt työmaan ajaksi, jotta jatkuva sähkönsaanti voitaisiin turvata.

Järjestelmä soveltui varsin hyvin kohteeseen ja sähkönsyöttöongelmia lukuun ottamatta järjestelmä toimi luotettavasti. Ajoittain tilan sisälämpötila nousi tarpeettoman korkeaksi, mikä johti epäsuotuisiin työskentelyolosuhteisiin ja tarpeettoman korkeaan energiankulutukseen. Korkea lämpötila johtui pitkälti siitä, että työmaalla käytettiin lattiakuivatusjärjestelmän lisäksi myös rakennuslämmittimiä lämmittämään sisäilmaa.

Koekohde B

Koekohteen B tarkasteltava betonirakenne raudoitettiin harjateräsraudoituksella, joten kosteudenkeruuputket voitiin kiinnittää tukevasti raudoitusverkkoon nippusiteillä tai rautalangalla eikä putkien nousemista päässyt tapahtumaan. Osin kosteudenkeruuputkien oikean korkoaseman varmistamiseksi valuun asennettiin ylimääräisiä raudoitteita kosteudenkeruuputkien kiinnitystä varten. Kohteessa kosteudenkeruukanavisto asennettiin ylä- ja alapinnan raudoitteiden väliin, joten kanavisto tuli asentaa kesken raudoitusurakan.

Tästä johtuen oli luontevaa, että kanaviston asennuksen teki raudoitusurakoitsija. Koe-kohteessa B rakennepaksaus oli (400 mm), joten halkeamisvaaraa ei lähtökohtaisesti ollut.

Raudoitusurakoitsijan mukaan kanaviston joustavat liitososat tuottivat osin ongelmia ja ovat rikkoontumisherkkiä putkien asennusvaiheessa sekä asennettaessa putkien yläpuolisia raudoitteita. Tässä kohteessa kosteudenkeruukanavistot olivat raudoitusurakan valmistuttua hyvin suojassa enimmiltä iskuilta raudoitusverkkojen välissä. Urakoitsija suosittelee, että liitososina käytettäisiin esimerkiksi 50 mm viemäriosia, jotka kestävät paremmin mekaanista rasitusta. Järjestelmätoimittajan mukana joustavat liitososat on koettu tarkoituksenmukaisimmaksi, koska sama joustava osa taipuu kaikkiin eri mutkiin ja myös suoriin liitoksiin.

Koekohteessa B kanavointi kuivatuslaitteistolta betonin sisällä olevaan runkokanavaan oli toteutettu taipuisalla ohutseinäisellä haitariputkella. Taipuisa kanava mahdollisti kuivatuslaitteiston siirtelyn työmaa-aikana pois työmaatoimintojen edestä, mutta toisaalta käytetty putki oli varsin herkkää sekä repeytymiselle että kasaan painumiselle. Mittauskäyntien aikana tarkasteltavalle alueelle johtavan putken havaittiin kerran olevan lähes kokonaan repeytynyt poikki ja useammalla kerralla putkissa havaittiin jonkin asteista kasaan painumista.

Koekohteessa B kuivatettava välipohja oli ilman kattavaa sääsuoja vielä useamman kuukauden kuivatuslaitteiston käynnistämisen jälkeen ja mittausalueelle lammikoitui ajoittain vettä. Ainakin yhden mittauskäynnin aikana kosteudenkeruukanavistossa havaittiin olevan vapaata vettä, joka oli todennäköisesti kulkeutunut runkokanavaan johtavan pystyputken juuresta. Kosteudenkeruukanavistoon kulkeutuva vapaa vesi voi kastella betonia sisältäpäin ja nostaa menoilman suhteellista ilmankosteutta hidastaen betonin kuivumista. Lisäksi kanavistoon kulkeutuva vapaa vesi ”vääristää” paluuilman mittausdataa ja voi antaa virheellisen kuvan rakenteesta kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvaan kosteuden määrästä.

Myös koekohteessa B havaittiin jonkinasteisia ongelmia sähkön syötössä. Sähkökatkot olivat pisimmillään muutamia vuorokausia. Sähkökatkoista saatiin tieto reaaliajassa, koska järjestelmässä oli alusta asti etäluettavat mittausanturit (lämpötila ja suhteellinen kosteus), joiden näyttämästä voitiin tehdä johtopäätöksiä järjestelmän toiminnasta.

Kuivatuslaitteiston käynnistämisen jälkeen ensimmäisten viikkojen aikana kohteessa oli ongelmia kuivaimen ja sähkövastuksen toiminnassa johtuen liitinrasiaan päässeestä kosteudesta, mikä laukaisi laitteen vikavirtasuojauksen useaan kertaan. Myös menoilman mittausanturi vioittui samanaikaisesti ja se vaihdettiin uuteen. Ensimmäisten viikkojen aikana ilmenneiden ongelmien jälkeen itse kuivatuslaitteisto toimi moitteetta lyhyitä sähkökatkoksia lukuun ottamatta.

5 MITTAUSTULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

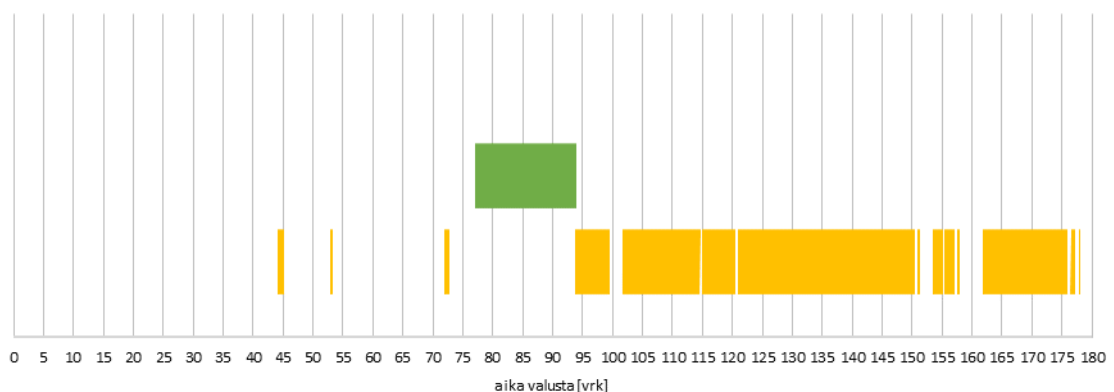
5.1 Koekohde A

5.1.1 Kuivatuslaitteiston käyntiajat

Mittaus tulosten aluksi ennen kuivumisolosuhteiden tarkastelua on välttämätöntä tarkastella kuivatuslaitteiston käyntiaikoja. Alkuperäisen suunnitelman mukaan kuivatuslaitteistoa oli tarkoitus pitää jatkuvalla käynnillä tarkastelujakson loppuun saakka kuivatuslaitteiston käynnistämisestä (44 vrk valusta) lähtien.

Kuivatuslaitteiston käyntiaikoja seurattiin menoilman lämpötilamuutosten avulla. Menoilman tiedonkerääjälaitteen sähkövirran saannissa esiintyneiden ongelmien vuoksi (katso kohta 4.4.3) mittausdataa saatiin kerättyä ainoastaan viideltä eri ajanjaksolta. Katkonaisen mittausdatan vuoksi käyntiajoista ei saatu kattavaa kuvaa välillä 44...102 vrk. Käyntiaikojen tarkempaa seuranta varten 102 vuorokauden kuluttua valusta asennettiin menoilman lämpötilaa mittaava etäluettava IOliving lämpötila-anturi + android puhelin. IOliving anturia käytettiin ainoastaan käyntiaikojen seurantaan. Ennen etäseuranta käyntiaikoja on tallentuneen menoilman mittausdatan lisäksi voitu arvioitu sisäilman lämpötilamuutoksista sekä mittauskäynneillä tehdyistä havainnoista.

Kuvassa 5.1 on esitetty mittausdataan tallentuneet kuivatuslaitteiston käyntiajat sekä työmaakäyntien havaintojen ja lämpötilamuutosten perusteella tehdyt arviot muiden aikavälien käyntiajoista.



Kuva 5.1. Kuivatuslaitteiston käyntiajat. Oranssilla janalla merkityillä ajanjaksoilla kuivatuslaitteiston käyntiajat on pystytty todentamaan menoilman lämpötilamittauksista. Kuvassa ei erotu alle 12 h käyntikatkot, joita oli tallentuneilla ajanjaksoilla muutamia. Vihreällä janalla merkityllä ajanjaksolla sisäilman lämpötila viittaa siihen, että kuivatuslaitteisto on ollut ainakin pääosin käynnissä.

Aikaväliltä 44...73 vrk kuivatuslaitteiston käyntiajoista ei ole mittausdataa kuin lyhyiltä ajanjaksoilta. Kuivatuslaitteistolle ja mittauskalustolle otettiin sähkövirta samalla jatkojohdolla työmaakeskukselta. Tästä syystä myös kuivatuslaitteistolta on katkennut virta samaan aikaan kuin menoilman lämpötilan tallentuminen on loppunut. Käytössä ollut dataloggeri ei käynnistynyt automaattisesti sähkövirran mahdollisen palaamisen jälkeen toisin kuin kuivatuslaitteisto. Onkin mahdollista, että kuivatuslaitteisto on käynyt tällä aika välillä myös muina aikoina kuin dataloggerille tallentuneilla ajanjaksoilla. Aikavälillä tehtiin kaksi työmaakäyntiä 53 vrk ja 73 vrk ja molemmilla työmaakäynneillä kuivatuslaitteistoa ja dataloggeria palveleva jatkojohto oli kytkettynä irti ja lattiarakenteen lämpötila on ollut muita rakenteita vastaava. Sisäilman lämpötila on tällä aikavälillä ollut hyvin lähellä ulkoilman lämpötilaa, josta päätellen tilassa ei ole ollut suurta lämpökuormaa. Joskin tarkasteltava tila on ollut avoinna suureen lämmittämättömään hallitilaan, joten on mahdollista, että pelkkä kuivatuslaitteiston käynti ei ole riittänyt nostamaan tilan lämpötilaa merkittävästi ulkoilman lämpötilaa korkeammaksi.

Aikaväliltä 77...94 vrk ei ole tallentunutta mittausdataa menoilman lämpötilasta, mutta sisäilman lämpötilan kehityksestä päätellen tilaan on tullut merkittävästi lisää lämpökuormaa. Tilassa ei ole tällä välillä ollut muita lämmönlähteitä, joten on todennäköistä, että lämpötilan nousu johtuu kuivatuslaitteiston käynnistä. Sisäilman lämpötila pysyy tällä aikavälillä hyvin tasaisena, joten on oletettavaa, että kuivatuslaitteisto on käynyt pääosan tästä aikavälistä.

Ajanhetkestä 102 vrk eteenpäin on ollut käytettävissä joko menoilman etäseuranta tai tallentava tulo- ja menoilman olosuhdeseuranta, joiden perusteella on dokumentoitu käyntiajat ja käyttökatkokset. Aikavälillä (102...178 vrk) kuivatuslaitteisto on käynyt noin 85 % ajasta. Lyhyempiä alle 12 h käyntikatkoja on ollut noin 10 kpl ja pisin käyntikatko tällä aikavälillä on ollut noin 4 vrk.

5.1.2 Kuivumisolosuhteet

Sisäilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta seurattiin Testo 174H mittalaitte-tiedonkerääjäyhdistelmällä 20 min tallennusvälillä. Mittalaitteen sijainti oli tutkittavan tilan ja hallitilan välisessä pilarissa noin 1,5 m korkeudella lattiapinnasta. Mittausjakson loppupuolella rakennustyöntekijät olivat siirtäneet mittalaitteen ulkoseinälle. Sisäilman olosuhde-mittalaitte asennettiin 53 vrk kuluttua valusta. Mittausta oli tarkoitus jatkaa mittausjakson loppuun saakka. Mittalaitteeseen tulleen häiriön vuoksi mittausdatan tallentuminen loppui kuitenkin noin 150 vrk kuluttua valusta.

Ulkoilman olosuhdetiedot hankittiin ilmatieteen laitoksen ilmastopalvelusta (Helsinki-Vantaan lentoaseman säähavaintoasema). Ilmatieteen laitoksen datassa tallennusväli on 60 min ja mittausdataa on koko mittausjakson 0...178 vrk ajalta. Sisä- ja ulkoilman mitatut olosuhteet on esitetty kuvassa 5.2.

Tarkastelujakson alussa (0...44 vrk) ennen kuivatuslaitteiston ja sisäilman olosuhdemittalaitteiden asentamista tila on ollut lämmittämätön ja avoinna suureen lämmittämättömään hallitilaan. Tilan ikkuna- ja oviaukot ovat olleet peitettynä rakennusmuovilla, mutta oviaukon muovi on ollut viillettyä auki. Oletuksena on, että sisäilman olosuhteet ovat olleet ulkoilman olosuhteita vastaavat. Ulkoilman olosuhteiden keskiarvot tältä aikaväliltä ovat: $T_{\text{ulko}} = 16,8 \text{ °C}$ ja $RH_{\text{ulko}} = 77,8 \text{ %}$.

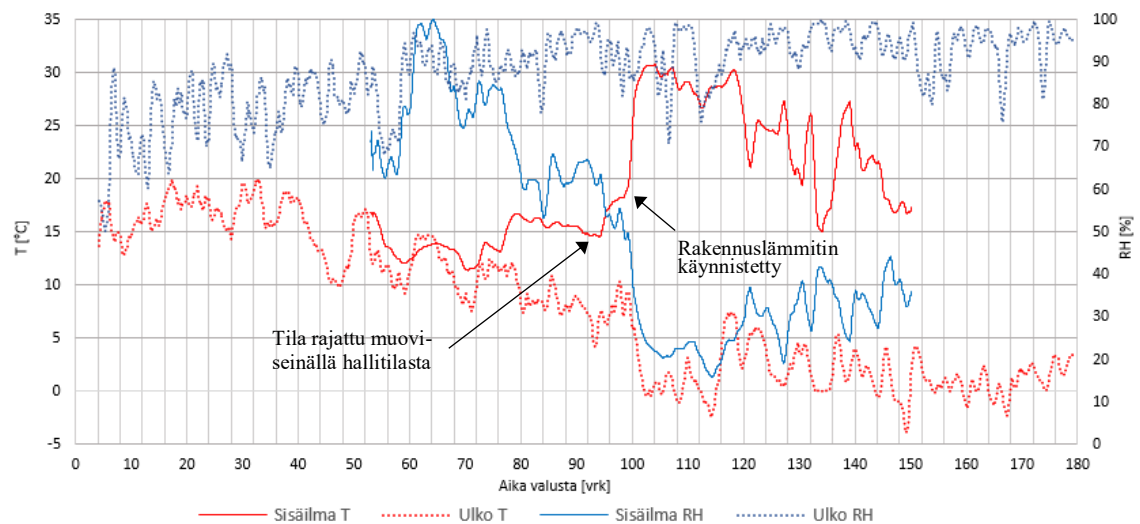
Aikavälin (44...77 vrk) aluksi asennettiin ja käynnistettiin kuivatuslaitteisto. Sisäilman sekä meno- ja paluuilman olosuhdemittaukset aloitettiin ajanhetkellä 53 vrk. Olosuhdemittauksen aloittamisen jälkeen aikavälillä (53...77 vrk) kuivatuslaitteisto on käynyt vain satunnaisesti. Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden keskiarvot tältä aikaväliltä ovat: $T_{\text{ulko}} = 11,6 \text{ °C}$ ja $T_{\text{sisä}} = 13,3 \text{ °C}$ sekä $RH_{\text{ulko}} = 86,5 \text{ %}$ ja $RH_{\text{sisä}} = 81,8 \text{ %}$.

Aikavälillä (77...100 vrk) sisäilman olosuhteet alkavat selkeämmin erottua ulkoilman olosuhteista. Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden keskiarvot tältä aikaväliltä ovat: $T_{\text{ulko}} = 8,4 \text{ °C}$ ja $T_{\text{sisä}} = 16,2 \text{ °C}$ sekä $RH_{\text{ulko}} = 91,9 \text{ %}$ ja $RH_{\text{sisä}} = 61,3 \text{ %}$. Tasaisesta lämpötilaerosta (sisä- ja ulkoilman välillä) päätellen, kuivatuslaitteisto on todennäköisesti ollut jatkuvassa käytössä mahdollisia lyhyitä sähkökatkoja lukuun ottamatta. Jakson aikana tilassa ei ole ollut muita lämmönlähteitä. Mittauskäyntien 5. (73 vrk) ja 6. (94) välisenä aikana tilaan on asennettu ikkunat. Kuvaajasta päätellen asennusajankohta on ollut mahdollisesti 81 vrk kohdalla, jonka jälkeen syklinen lämpötilavaihtelu on tasaantunut. 95 vrk kohdalla lämpötilassa tapahtuu selkeä muutaman asteen nousu, joka johtuu mahdollisesti tilan rajaamisesta muoviseinällä hallitilasta.

Aikavälillä (100...120 vrk) sisäilman lämpötilassa tapahtuu ensin voimakas lämpötilanousu parin ensimmäisen päivän aikana, minkä jälkeen lämpötila pysyy kohtalaisen tasaisesti korkeana ja vastaavasti sisäilman suhteellinen kosteus alhaisena. Ajanjakson alussa tapahtuva lämpötilan nousu johtuu todennäköisesti tilaan tuodun rakennuslämmittimen lämmittävästä vaikutuksesta. Ajanhetkellä 102 vrk menoilmaan asennettiin etäluettava lämpötila-anturi kuivatuslaitteiston käyntiaikojen tarkempaa seurantaa varten. Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden keskiarvot tältä aikaväliltä ovat: $T_{\text{ulko}} = 1,7 \text{ °C}$ ja $T_{\text{sisä}} = 29,1 \text{ °C}$ sekä $RH_{\text{ulko}} = 90,1 \text{ %}$ ja $RH_{\text{sisä}} = 22,9 \text{ %}$.

Aikavälillä 120...145 vrk tilassa on tehty sisävalmistusvaiheen töitä kuten väliseinien rakentamista ja ulkoseinien sisäverhouslevyjen asentamista ja tasoitetöitä. Etäluettavan seurannan mukaan kuivatuslaitteisto on käynyt lyhyitä katkoja lukuun ottamatta hyvin tasaisesti. Lyhyet katkot eivät näy sisäilman lämpötilassa betonilattian lämmönvarausrakenteesta johtuen. Sisäilman lämpötilassa esiintyvä voimakas vaihtelu johtuu hyvin todennäköisesti rakennuslämmittimen epätasaisesta käytöstä. Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden keskiarvot tältä aikaväliltä ovat: $T_{\text{ulko}} = 2,4 \text{ °C}$ ja $T_{\text{sisä}} = 22,5 \text{ °C}$ sekä $RH_{\text{ulko}} = 95,6 \text{ %}$ ja $RH_{\text{sisä}} = 31,9 \text{ %}$.

Aikavälillä (145...178 vrk) ulkoilman olosuhteet ($T_{\text{ulko}} = 0,86\text{ °C}$ ja $RH_{\text{ulko}} = 92,8\%$) ovat pysyneet samankaltaisina kuin edeltävinä viikkoina ja kuivatuslaitteisto on ollut muutamia katkoja lukuun ottamatta käytössä. Rakennuslämmittintä ei ole enää käytetty tilassa. Ennen olosuhdemittauksen katkeamista aikavälillä (145...150 vrk) sisäilman olosuhteiden keskiarvot olivat: $T_{\text{sisä}} = 17,4\text{ °C}$ ja $RH_{\text{sisä}} = 38,4\%$. Sisäilman olosuhdemittauksen katkeamisen (150 vrk) jälkeen sisäilman olosuhteista ei ole tarkkaa tietoa. Ajanjaksolla oli tasaisin välein viisi kuivatuslaitteiston käyntikatkoa (5h...95h). Voidaan olettaa, että käyntikatkoksen aikana kuivatuslaitteiston menoilma-anturin lämpötilanäyttämä on lähellä sisäilman lämpötilaa. Käyntikatkoksen aikana menoilman lämpötilamittauksien perusteella tilan lämpötilat putosivat katkoksesta riippuen katkoksen alun 18...22 °C lämpötilasta katkoksen lopun 12...16 °C lämpötilaan. Menoilman lämpötilat mittausjakson ajalta on esitetty kohdassa 5.1.3 *meno ja paluuilman lämpötilat*.



Kuva 5.2. Sisä- ja ulkoilman lämpötila- ja suhteellisen kosteus mittausjakson ajalta. Kuvaajassa on käytetty mittaustulosten 24 h liukuvaa keskiarvoa kuvaajien vuorokausijonnan poistamiseksi.

Pyrittäessä tehokkaihin kuivumisaikoihin työmaaolosuhteissa, sisäilman suotuisina kuivumisolosuhteina pidetään tavanomaisesti $T \geq 20\text{ °C}$ ja $RH \leq 50\%$ (BY201). Olosuhteiden ollessa heikommat esimerkiksi 15 °C ja $RH\ 80\%$ maanvaraisen laatan arvioitu kuivumisaika kasvaa noin 1,7 kertaiseksi verrattuna olosuhteisiin edellä mainittuihin suotuisiin kuivumisolosuhteisiin (BY1021).

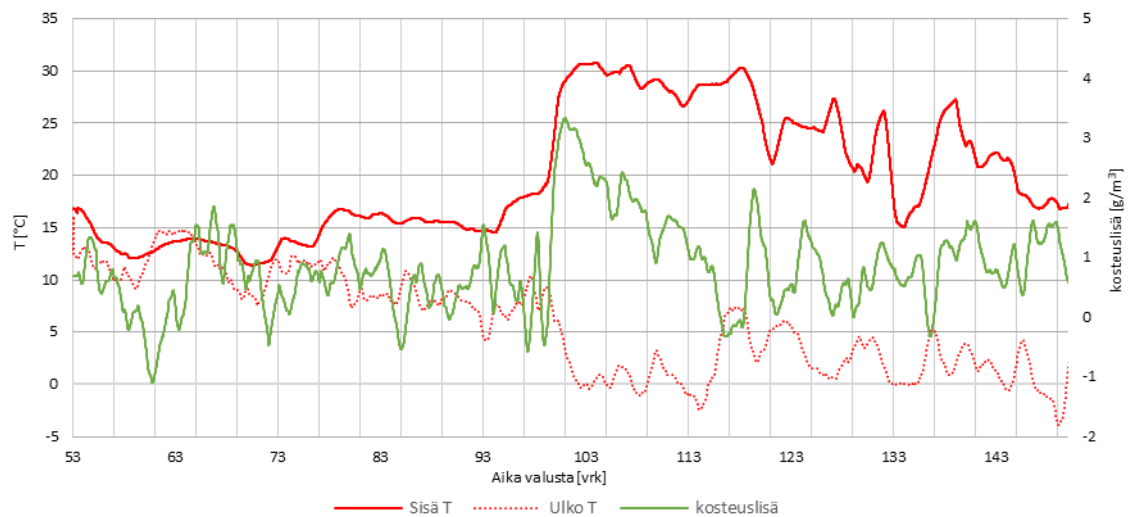
Tarkastelujakson ensimmäisten 77 vrk aikana ennen kuivatuslaitteiston jatkuvaa käyntiä sisäilman olosuhteiden keskiarvot olivat $T \sim 15\text{ °C}$ ja $RH \sim 81\%$. Ottaen huomioon lisäksi, että tarkasteltavalle alueelle lammikoitui paikoitellen sadetta vielä noin 90 vrk päästä valusta, ovat kuivatusolosuhteet tarkastelujakson alkupuolella (0...77 vrk) olleet erittäin epäsuotuisat yläpinnan kautta tapahtuvalle kuivumiselle.

Kuivatuslaitteiston käydessä, mutta rakennuslämmittimen ollessa poissa käytöstä (aika- välit: 77...100 vrk ja 145...178 vrk) keskimääräiset kuivatusolosuhteet olivat jo varsin

hyvät $T \sim 17\text{ °C}$ ja $RH \sim 48\%$ ja kuivuminen yläpinnan kautta on todennäköisesti ollut näillä aikaväleillä huomattavasti tehokkaampaa.

Kuivatuslaitteiston ja rakennuslämmittimen käydessä ainakin osa-aikaisesti (100...145 vrk) keskimääräiset kuivatusolosuhteet ovat olleet erinomaiset: $T \sim 25\text{ °C}$ ja $RH \sim 29\%$ ja kuivuminen yläpinnan kautta on ollut tehokasta.

Sisäilman kosteuslisä sekä sisä- ja ulkoilman lämpötilat aikaväliltä 53...150 vrk on esitetty kuvassa 5.3. Kosteuslisän arvot 24 h liukuvalla keskiarvolla ovat pääosin välillä 0...3 g/m³ keskiarvon ollessa 0,9 g/m³. Kosteuslisässä tapahtuu selkeä nousu noin 98 vrk kuluttua valusta, mutta kosteuslisä palautuu lähelle tarkastelujakson alun arvoja noin kahden viikon kuluessa. Kosteuslisän nousun aikoihin on rakennettu suojaseinä rajaamaan tarkasteltavaa tilaa suuresta hallitilasta ja asennettu rakennuslämmitin lämmittämään tilaa.



Kuva 5.3. Sisäilman kosteuslisä, sekä sisä- ja ulkoilman lämpötilat aikavälillä 53...148 vrk.

Adsorptiokuivain puhalttaa kaiken kosteudenkeruupiiristä keräämänsä kosteuden vesihöyrymuodossa kostean ilman poistoilmayhteen kautta ulos kuivaimesta. Tässä kohteessa kosteudenkeruupiiristä kerätty kostea ilma puhallettiin takaisin huonetilaan eli kuivain kostuttaa tutkittavan tilan sisäilmaa. Adsorptiokuivaimen kosteustuotto kuivatusjärjestelmän käydessä oli pääosin välillä 18...45 g/h tarkasteltavan tilan tilavuusyksikköä [m³] kohden. Kuivaimen kosteustuotolla ei todennäköisesti ole ollut juurikaan merkitystä tilan kosteussisältöön ennen kuin tila rajattiin hallitilasta suojaseinällä.

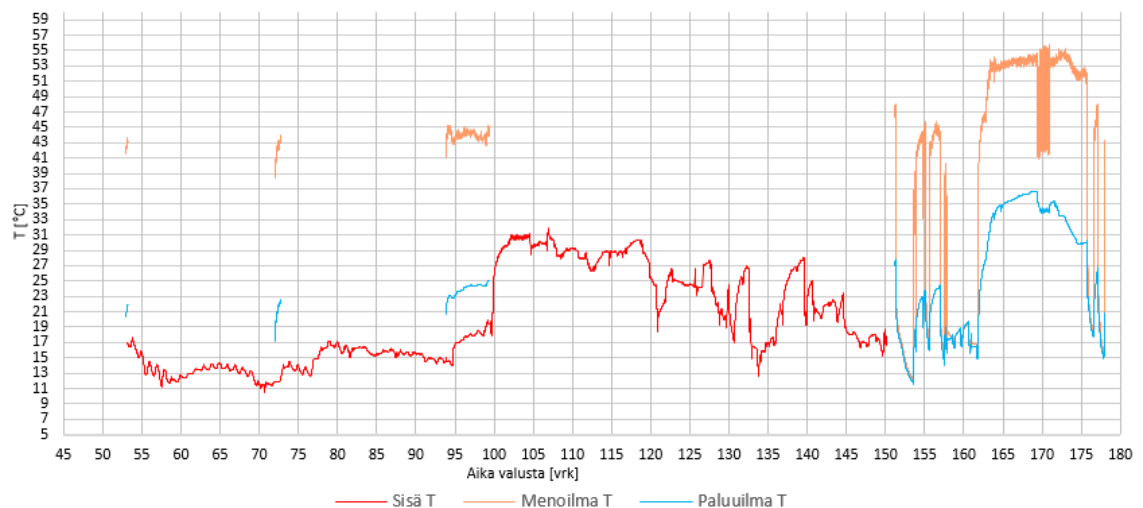
Kosteuslisän äkillinen nousu (noin 97 vrk kohdalla) selittyykin mahdollisesti suojaseinän rakentamisella, joka hidastaa kosteuden poistumista tarkasteltavasta tilasta. Lisäksi kuivatusolosuhteiden parantuminen rakennuslämmittimen aiheuttaman lämpötilan nousun myötä tehostaa pintojen kautta tapahtuvaa haihtumista ja lisää näin ollen kokonaiskosteustuottoa. Kosteuslisän tarkempi analysoiminen vaatisi tietoa tilan ilmanvaihtuvuudesta, mitä ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu.

5.1.3 Meno- ja paluuilman olosuhteet ja kosteusvirta

Kosteudenkeruukanaviston meno- ja paluuilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta seurattiin Vaisala HMP44 mittalaite + Grant SQ2040 tiedonkerääjä -yhdistelmällä 15 minuutin tallennusvälillä. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella laskettiin meno- ja paluuilman kosteussisällöt. Meno- ja paluuilman kosteussisällön erotuksen ja kanavistossa kiertävän ilmamäärän avulla saatiin määritettyä kanaviston kautta poistuva kosteusvirta. Kosteusvirran yksikkönä on käytetty poistuvan kosteusmäärän massaa lattianeliometriä kohden yhden tunnin aikana [$\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$]. Todellisuudessa kosteusvirta ei jakautunut tasaisesti lattiarakenteeseen vaan kosteutta poistuu suurempia määriä kosteudenkeruu kanavan ympäriltä. Menoilman anturi sijaitsi menoilman runkokanavassa puhaltimen ja kanavalämmittimen jälkeen noin 100 mm lattiapinnan yläpuolella. Paluuilman anturi oli paluuilman runkokanavassa noin 300 mm lattiapinnan yläpuolella ennen adsorptiokuivainta.

Mittalaitteet asennettiin 53 vrk kuluttua valusta. Mittausta oli tarkoitus jatkaa yhtäjaksoisesti mittausjakson loppuun saakka. Tiedonkerääjälaitteen sähkövirran saannissa esiintyneiden ongelmien vuoksi (katso kohta 4.4.3) mittausdataa saatiin kerättyä ainoastaan neljältä eri pituiselta ajanjaksolta.

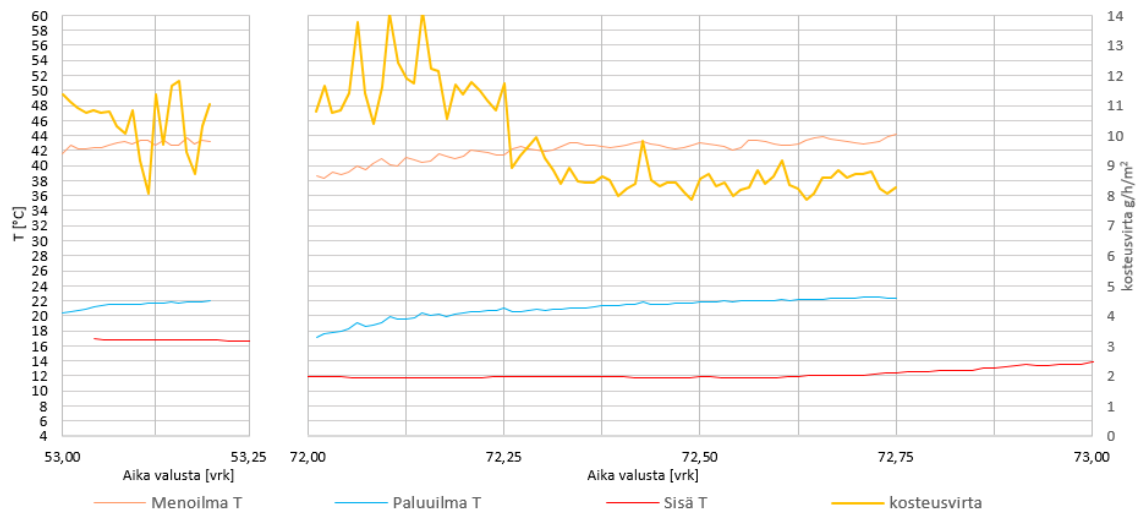
Meno- ja paluuilman lämpötilat tallentuneilta osin sekä sisäilman lämpötila kuivatuslaitteiston asentamisesta tarkastelujakson loppuun on esitetty kuvassa 5.4. Tallentuneiden jaksojen meno- ja paluuilman lämpötilat, sisäilman lämpötila sekä kosteudenkeruupiirin kautta poistuneen kosteusvirran arvot on esitetty kuvissa 5.5 ja 5.6.



Kuva 5.4. Sisäilman lämpötila sekä meno- ja paluuilman lämpötilat tallentuneilta osin kuivatuslaitteiston käynnistämisen jälkeen.

Kuten kuvasta 5.4 voimme havaita, meno- ja paluuilman mittauksen tallentunut data on hyvin katkonaista varsinkin mittausjakson alkupuolella. Viimeisen kuukauden ajalta saatiin yhtenäinen mittausjakso. Menoilman lämpötilat alun tasaantumiseen jälkeen tallentuneilla jaksoilla olivat pääosin suunnitellulla tasolla 43...45 °C. Aikavälillä 163...176

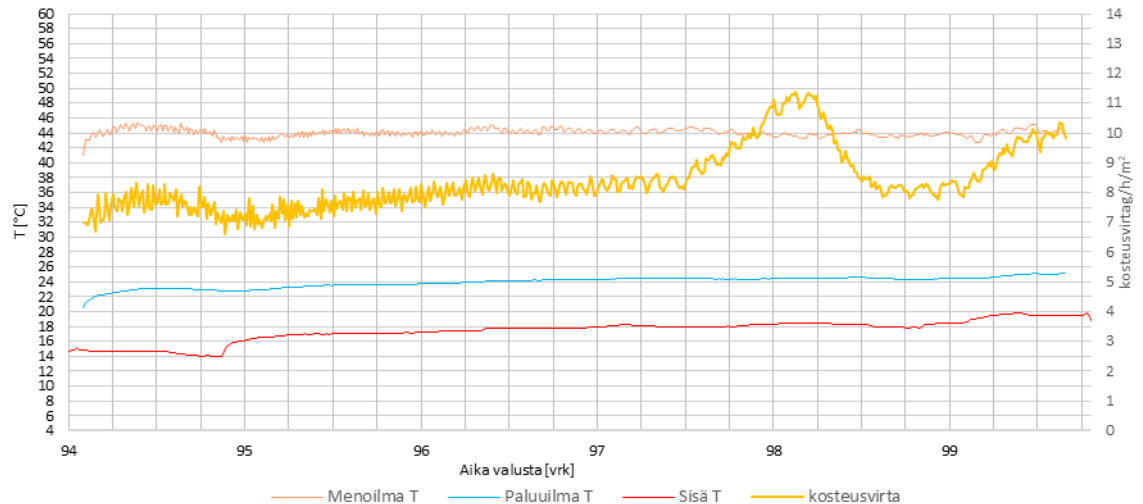
vrk lämpötilat ovat kuitenkin nousseet selvästi lähes 10 °C asetetun tason yläpuolelle. Todennäköisesti termostaatin lämpötila-anturissa on ollut häiriötä tänä aikana. Meno ja paluuilman lämpötiloissa on havaittavissa selkeä korrelaatio. Katkonaisen mittausdatan vuoksi korrelaatiota sisäilmaan ei voitu tarkastella. Viimeisen tallentuneen jakson aikana saatiin meno- ja paluuilman mittausdataa myös aikaväleiltä, jolloin kuivatuslaitteisto ei käynyt. Näillä aikaväleillä meno- ja paluuilman lämpötilat tasaantuivat oletetulle huoneilman tasolle.



Kuva 5.5. Meno- ja paluuilman lämpötilat, sisäilman lämpötila sekä kosteudenkeruukaviston kautta poistunut kosteusvirta kahden ensimmäisen tallentuneen jakson ajalta.

Ensimmäisen ja toisen tallentuneen jakson pituudet ovat 6 h ja 12 h. Molempia jaksoja ennen on ollut kuivatuslaitteiston käyttökatkos (pituus ei tiedossa) Kuivatuslaitteisto on käynnistetty joitakin tunteja ennen tallentuneiden ajanjaksojen alkua ja kuivatuslaitteisto kävi molemmilla tallentuneilla jaksoilla koko jakson ajan. Meno- ja paluuilman lämpötilat eivät ole tasaantuneet ennen tallennusjaksojen alkua eivätkä ehdi tasaantua jaksojen aikana vaan nousevat jaksojen ajan. Paluuilman lämpötilat seuraavat tasaisesti menoilman lämpötiloja. Lämpötilaero pysyy noin 20...22 °C.

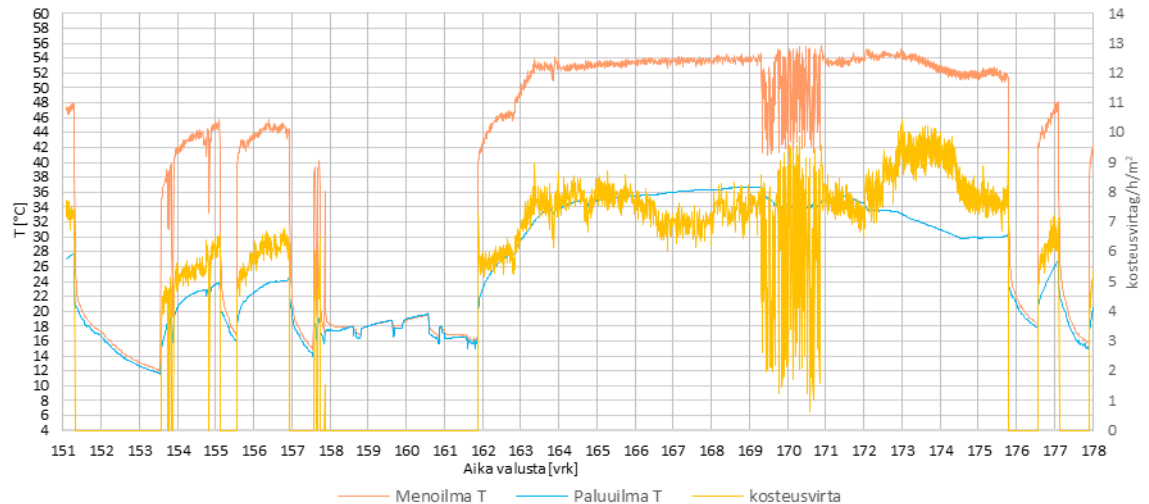
Kosteudenkeruupiiristä poistuvan kosteusvirran arvot vaihtelevat välillä 8...14 g/m²/h. Jälkimmäisen jakson loppupuolella koseusvirta tasaantuu noin 8...9 g/m²/h. Näin lyhyillä aikaväleillä kosteusvirran arvossa ei havaita korrelaatiota meno- ja paluuilman lämpötiloihin.



Kuva 5.6. Meno- ja paluuilman lämpötilat, sisäilman lämpötila sekä kosteudenkeruukanaviston kautta poistunut kosteusvirta kahden ensimmäisen tallentuneen jakson ajalta.

Kolmannen tallentuneen jakson pituus on 5 vrk ja 4 h. Kuivatuslaitteistossa oli käyntikatkos (pituus ei tiedossa) ennen tallentuneen jakson alkua. Kuivatuslaitteisto käynnistettiin tallennusjakson alussa ja laitteisto kävi koko tallentuneen jakson ajan. Menoilman lämpötila nousi ensimmäisen kahdeksen tunnin aikana muutaman asteen ja tasaantui sen jälkeen 43 ja 45 °C asteen välille. Paluuilman lämpötila nousi hiukan koko jakson ajan ollen jakson loppupuolella noin 25 °C. Huoneilman lämpötila nousi jakson aikana 14... 20 °C. Meno- ja paluuilman lämpötilan erotus oli koko jakson ajan 19...23 °C välillä.

Kosteudenkeruupiiristä poistuvan kosteusvirran arvot vaihtelevat pääosin 7 ja 11 g/m²/h välillä ja keskimääräinen kosteusvirta on noin 8 g/m²/h. Kosteusvirran arvoissa tapahtuu merkittävä noin vuorokauden mittainen kohouma 98 vrk kohdalla, jolloin kosteusvirran arvo nousee noin 3 yksikköä, vaikka lämpötiloissa ei näy poikkeamaa. Kosteusvirran arvossa ei havaita korrelaatiota meno- ja paluuilman lämpötiloihin.



Kuva 5.7. Meno- ja paluuilman lämpötilat, sekä kosteudenkeruukanaviston kautta poistunut kosteusvirta viimeisen tallentuneen jakson aikana.

Viimeisen tallentuneen jakson pituus on 26 vrk ja 23 h. Kuivatuslaitteisto on käynyt pääosan tarkastelujaksosta, katkoksia on ollut noin 35 % jakson pituudesta. Meno- ja paluuilman lämpötiloissa on runsaasti vaihtelua alkuvaiheessa ennen pidempää käyttökatkota kuivatuslaitteiston menoilman lämpötilat vaihtelevat välillä 41...46 °C (menoilma) ja 11...25 °C (paluuilma). Tarkastelujakson loppupuolella sekä meno- että paluuilman lämpötilat nousevat, menoilman lämpötila tasolle 53...55 °C ja paluuilman lämpötila tasolle 27...37 °C. Aikavälillä 169...171 vrk menoilman lämpötilassa on voimakasta sahaavaa liikettä 42 ja 54 °C välillä. Lämpötilavaihtelun syy ei ole selvillä.

Kuivatuslaitteiston käydessä kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvan kosteusvirran arvot vaihtelevat pääosin 4 ja 10 g/m²/h välillä. Ennen pidempää käyntikatkoa lämpötilojen ollessa alhaisempia 153...157 vrk keskimääräinen kosteusvirta oli 5 ja 6 g/m²/h välillä ja käyntikatkon jälkeen lämpötilojen noustessa keskimääräinen kosteusvirta on noin 8 g/m²/h. Kuivatuslaitteiston käyntikatkosten aikana puhallin ei kierrätä ilmaa, joten kosteusvirran arvoksi on laskettu 0 g/m²/h. Viimeisellä tallentuneella aikavälillä kosteusvirran arvossa on havaittavissa korrelaatio erityisesti menoilman lämpötilan kanssa. Toki poikkeaveakin ajanjaksojakin on muun muassa aikavälillä 173...174 oleva kohouma kosteusvirran arvoissa. Tällä aikavälillä kosteusvirran arvo on noin 2 g/m²/h suurempi kuin ympäröivinä ajanjaksoina, vaikka menoilman lämpötiloissa ei havaittu muutoksia.

Kaikilta tallentuneilta jaksoilta mitatut kosteusvirran arvot vastaavat hyvin aiemmissa tutkimuksissa vastaavilla kuivatusjärjestelyillä saatuja keskimääräisiä kosteusvirran arvoja 8...11 g/m²/h (Ahvenainen 2016) ja 7 g/m²/h (Oksala 2016). Mitatut kosteusvirran arvot olivat kuitenkin huomattavasti korkeampia kuin Leivon et. al tutkimuksessa saadut 1...5 g/m²/h. Selittävä tekijä on todennäköisesti Leivon et al. koejärjestelyistä poikkeavat koejärjestelyt sillä Leivon tutkimuksessa ei käytetty ollenkaan ilmankuivainta ja lisäksi käytetyt menoilman lämpötilat olivat huomattavasti alhaisempia.

Tässä tutkimuksessa kuivatusjärjestelmä asennettiin vasta noin 44 vrk valun jälkeen, jolloin betonin suhteellinen kosteus putken ympäriltä oli jo pudonnut alle kapillaarisen alueen, joten kosteusvirran arvoissa ei tapahtunut nopeaa kosteusvirran alenemaa betonin kuivaessa nopeasti putken ympäriltä. Kosteusvirran arvot olivat yllättävän korkeita myös tarkastelujakson viimeisellä tallentuneella jaksolla. Erityisesti menoilman lämpötilan noustessa yli viidenkymmenen asteen kosteusvirran arvot nousivat samoihin lukemiin kuin kuivumisen alkuvaiheessa, vaikka betonin kosteussisältö on huomattavasti alhaisempi kuin kuivumisen alkuvaiheessa. Tätä ilmiötä selittää todennäköisesti rakenteen korkea lämpötila suhteessa alkuvaiheen kuivumiseen.

Meno- ja paluuilman olosuhteita mitattiin vain yhdestä pisteestä, joten tässä tutkimuksessa mittaustuloksista ei voida erottaa eri mittausalueilta poistuvaa kosteutta. On todennäköistä, että päällystetyiltä alueilta kosteusvirran arvot kosteudenkeruukanaviston kautta ovat suurempia kuin muilta alueilta, koska kuivumista tapahtuu ainoastaan kanaviston kautta.

Katkonaisesta mittausdatasta johtuen kosteudenkeruukanaviston kautta koko kuivatusjakson aikana poistuneen kumulatiivisen kosteusvirran arvoa ei voitu laskea täsmällisesti. Kumulatiivisen kosteusvirran suuruusluokkaa voidaan kuitenkin arvioida kuivatuslaitteiston kokonaiskäyntiajan (arvio noin 70 vrk) ja tallentuneiden jaksojen keskimääräisen kosteusvirran ($7,2 \text{ g/m}^2/\text{h}$) arvoilla. Edellä esitetyillä arvoilla kumulatiivinen kosteusvirta kosteudenkeruukanaviston kautta koko tarkastelujakson ajalta on noin 12 kg/m^2 eli rakennepaksuus huomioiden noin 120 kg/m^3 . Luvussa 3.2 *kosteuden sitoutuminen tuoreeseen betoniin* arvioitiin kirjallisuuslähteisiin nojaten, että tasolle RH 90 % tasaantuneesta tavanomaisesta lattiabetonista ($v/s = 200\text{kg}/250\text{kg} = 0,8$) on poistunut kosteutta haihtumiskuivumisen seurauksen noin 50 kg/m^3 ja jäljellä olevan haihtumiskykyisen kosteuden määrä, poislukien geelivesi, on noin 70 kg/m^3 . Tähän verraten koekohteessa kosteudenkeruukanaviston kautta poistuneen kosteuden määrä vaikuttaa korkealta. Etenkin kun kuivatuslaitteisto asennettiin vasta noin 44 vrk valun jälkeen eli oletettavasti rakenteesta oli poistunut merkittävä määrä kosteutta yläpinnan kautta jo ennen kuivatuslaitteiston käynnistämistä ja lisäksi osa kuivatuslaitteiston palvelualueesta oli yläpinnaltaan avonaista päällystämätöntä aluetta tarkastelujakson loppuun saakka. Ristiriita kanaviston kautta poistuneen kosteuden määrässä voi selittyä esimerkiksi rakenteen kastumistella tai maaperästä diffuusiolla noussella ylimääräisellä haihdutettavalla kosteudella. On myös mahdollista, että tallentuneilta jaksolta mitatut keskimääräiset kosteusvirran arvot ovat korkeampia kuin kosteusvirran arvot muilta ajanjaksoilta johtuen siitä, että tallentuneet jaksot alkoivat heti pidemmän käyntikatkoksen jälkeen ja viimeisen pisimmän tallentuneen jakson aikana lämpötilat olivat muita ajanjaksoja korkeampia.

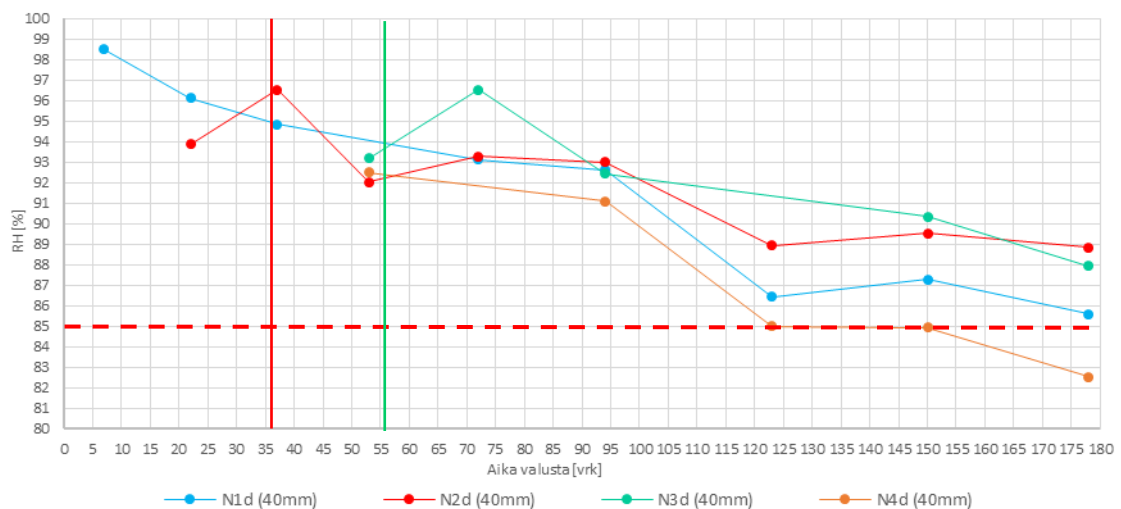
5.1.4 Betonin suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys

Betonin suhteellista kosteutta mitattiin näytepalamittauksilla. Mittalaitteina käytettiin Vaisalan HMP44-kosteusmittapäitä + HMI41-lukulaitetta. Mittaussyvyyydet olivat betonin (pinta 5 mm), välisyvyys (16 mm) ja arviointisyvyys (40 mm). Tarkasteltava tila jaettiin neljään mittausalueeseen kuivatus ja päällystysjärjestelyiden mukaan (katso kohta 4.3.1 mittausalueet). Kuivatettavilta alueilta mittausalueet jaettiin vyöhykkeisiin a ja d siten, että vyöhyke a sijaitsee kosteudenkeruuputken kohdalla ja vyöhyke d kahden putken keskivälissä 200 mm vaakaetäisyydellä putkista. Vyöhykkeeltä a näytepalat otettiin ainoastaan pinnasta ja välisyvyydeltä.

kosteudenkeruuputkien välissä vyöhyke d

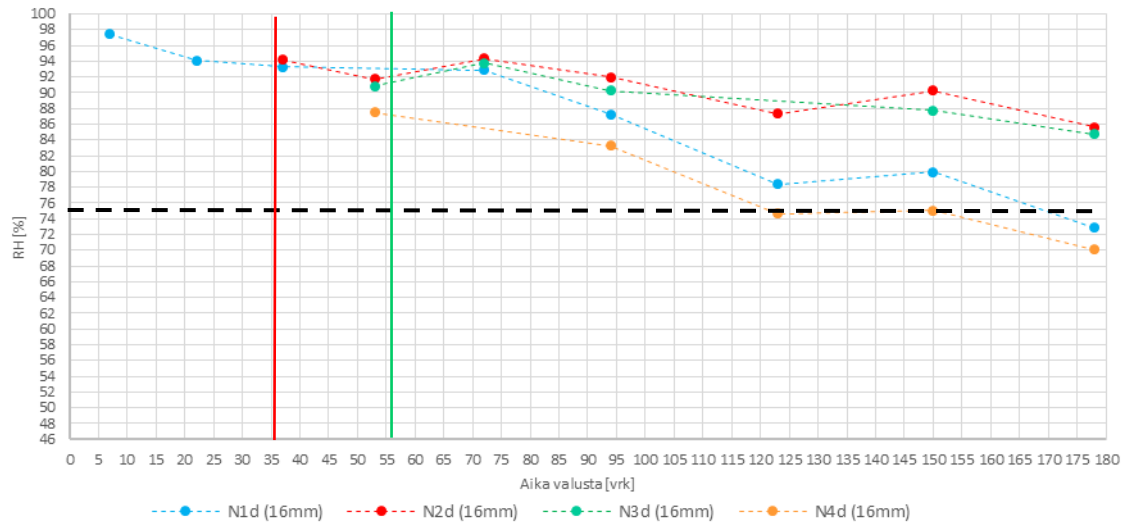
Eri mittausalueiden suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys vyöhykkeillä d tarkasteltavilla mittaussyvyyksillä on esitetty kuvissa 5.8 ja 5.9 Kuvaajien x-akseli (aika vuorokausina valusta) on kaikissa kuvaajissa sama 0...180 vrk. Y-akselia (suhteellinen kosteuspitoisuus) on skaalattu tarpeen mukaan siten, että kuvaajien lukeminen on mahdollisimman selkeää.

Arviointisyvyydellä lähtökosteus jälkihoidon jälkeen on noin 98 % RH ja laskee mittausalueesta riippuen tasolle 82...89 % RH tarkastelujakson aikana. Päällystetyillä alueilla (2d ja 3d) suhteellinen kosteuspitoisuus jää korkeammaksi kuin päällystämättömillä alueilla. Päällystämättömällä ja kuivatetulla alueella 4d suhteellinen kosteus laski tarkastelujakson aikana oletetusti alhaisimmaksi. Mittausalueella 4d rakenne alittaa kriittisen kosteusraja-arvon (85 % RH) noin 120 vuorokauden kuluttua valusta. Muilla mittausalueilla raja-arvo ei alitu 180 vrk tarkastelujakson aikana.



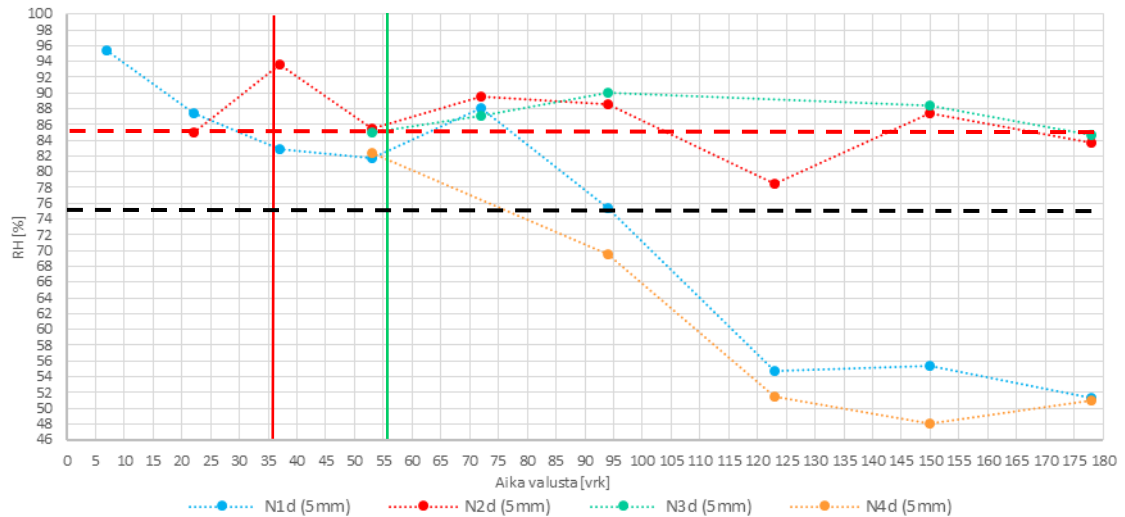
Kuva 5.8. Betonin suhteellisen kosteuden kehitys eri mittausalueilla vyöhykkeellä d (putkien välissä) eri mittausalueilla arviointisyvyydellä (40 mm). Päällystysajankohdat on korostettu pystyviivoilla (punainen mittausalue 2 ja vihreä mittausalue 3). Päällystettävyyden raja-arvo 85 % RH on korostettu punaisella katkoviivalla.

Välisyvyydellä (0,4 x arviointisyvyys) lähtökosteus jälkihoidon jälkeen on noin 97 % RH ja laskee mittausalueesta riippuen 70...86 % RH tarkastelujakson aikana. Päälystetyillä alueilla (2d ja 3d) suhteellinen kosteuspitoisuus jää selkeästi korkeammaksi kuin päälystämättömillä alueilla. Päälystämättömällä ja kuivatetulla alueella 4d suhteellinen kosteus laski tarkastelujakson aikana oletetusti alhaisimmaksi. Mittausalueella 4d rakenne saavuttaa rakenteen pintaosille asetetun yleisvaatimuksen (75 % RH) noin 125 vuorokauden ja mittausalueella 1d noin 175 vuorokauden kuluttua valusta.



Kuva 5.9. Betonin suhteellisen kosteuden kehitys eri mittausalueilla vyöhykkeellä d (putkien välissä) välisyvyydellä (16 mm). Päälystysajankohdat on korostettu pystyviivoilla (punainen mittaalue 2 ja vihreä mittaalue 3). Päälystettävyyden raja-arvo välisyvyydellä 75 % RH on korostettu mustalla katkoviivalla.

Rakenteen pinnassa lähtökosteus jälkihoidon jälkeen on noin 96 % RH ja laskee mittausalueesta riippuen 48...85 % RH tarkastelujakson aikana. Rakenteen pintakerroksen kosteuspitoisuudet eroavat voimakkaasti toisistaan päälystetyillä ja päälystämättömillä alueilla. M4a suhteellinen kosteus laski tarkastelujakson aikana oletetusti alhaisimmaksi. Mittausalueella 4d rakenne saavuttaa rakenteen pintaosille ennen päälystystä asetetun vaatimuksen (75 % RH) noin 75 vuorokauden ja mittausalueella 1d noin 95 vuorokauden kuluttua valusta. Päälystetyillä alueilla vaatimuksena on, että suhteellinen kosteus pysyy alle 85 % RH koko lattianpäälysteen elinkaaren ajan. Tarkastelujakson lopulla päälystetyillä alueilla kosteuspitoisuus on niukasti alle 85 % RH ja trendi on laskeva.



Kuva 5.10. Betonin suhteellisen kosteuden kehitys eri mittausalueilla vyöhykkeellä d (putkien välissä) betonin pintakerroksessa (5 mm). Päälystysajankohdat on korostettu pystyviivoilla (punainen mittausalue 2 ja vihreä mittausalue 3). Kiinnitysliiman vaurioitumisen kannalta kriittisenä kosteuspitoisuutena yleisesti pidetty arvo 85 % RH on korostettu punaisella katkoviivalla.

Kaikilla mittausvyvyksillä päälystetyillä alueilla kosteuspitoisuus nousee päälystys-hetken jälkeen, joka johtuu rakenteen kosteuskajaan tasaantumisesta, kun haihtuminen rakenteen pinnasta on pääosin estetty. Kosteuspitoisuuden useamman prosenttiyksikön suuruinen nousu päälystämisen jälkeen, myös arvostelusyvytydellä oli yllättävän suuri 2-3 %-yksikköä. Tämä saattaa selittyä osittain myös mittausepä-tarkkuudella, koska kaikki ajanhetkellä 53 vrk otetut mittautulokset ovat jostain syystä selkeästi trendikäyriä alempana.

Tarkastelujakson alussa 0...72 vrk suhteellinen kosteuspitoisuus kaikilla mittausalueilla ja syvyyksillä vaihtelee ja kuivuminen on varsin vähäistä. Tällä aikavälillä kuivatuslaitteisto ei ole ollut päällä kuin hetkittäin ja sisäilman olosuhteet ovat olleet yläpinnan kautta tapahtuvalle kuivumiselle heikot: sisäilman lämpötila noin 15 °C ja suhteellinen kosteus noin 80 %. Tarkasteltavalle rakenteelle paikoitellen kulkeutuneet ja lammikoituneet sadevedet ovat mahdollisesti aiheuttaneet vaihtelua erityisesti rakenteen pintaosien tuloksiin.

Aikavälillä 72...94 vrk betonin suhteellinen kosteuspitoisuus kaikilla mittausalueilla ja syvyyksillä, lukuun ottamatta päälystettyjen alueiden pintakerrosta lähtee selkeästi las-kuun. Tämä on ollut ensimmäinen aikaväli, jolloin kuivatuslaitteisto on oletettavasti pääosin käynnissä ja tästä johtuen sisäilman keskimääräiset kuivatusolosuhteetkin ovat hii-kan parantuneet tasolle noin 16 °C ja RH 60 %.

Aikavälillä 94...123 vrk kuivuminen kaikilla mittausalueilla on ollut selkeästi muita ai-kavälejä nopeampaa. Muun muassa arviointisyvytydellä suhteellinen kosteuspitoisuus on laskenut mittausalueesta riippuen 4...6 prosenttiyksikköä. Tällä aikavälillä kuivatuslait-teiston on käynyt lähes ilman katkoja, tilaan on tuotu rakennuslämmitin ja tila on rajattu

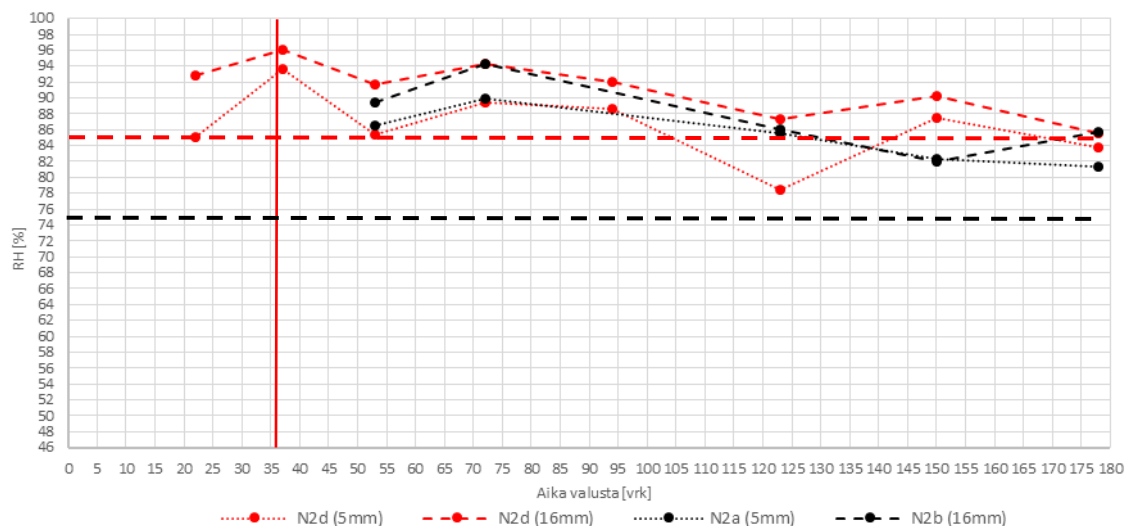
hallitilasta muoviseinällä. Näistä johtuen tilan sisäilman keskimääräiset kuivatusolosuhteet ovat olleet erittäin hyvät: lämpötila pääosin yli 28 °C ja RH 25 %. Aikaväliltä 100...120 vrk, jolloin kuivatusolosuhteet olivat parhaimmillaan ei ole mittaustuloksia meno- ja paluuilman olosuhteista ja kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvasta kosteusvirrasta, mutta oletettavasti korkea sisälämpötila on nostanut myös kuivatettavan rakenteen lämpötilaa ja näin kiihdyttänyt kosteuden poistumista myös kanaviston kautta.

Aikavälillä 123...150 vrk nopean kuivumisvaiheen jälkeen kuivumisessa tulee selvä taantuma kaikilla mittausalueilla ja mittaussyvyyksillä. Taantuma selittyy ainakin osittain sillä, että rakennuslämmittimen käytön vähentäminen laskee sisäilman keskimääräistä lämpötilaa noin kuudella asteella tavanomaisemmalle tasolle noin 21 °C. Sisäilman lämpötilan lasku on oletettavasti pudottanut myös kuivatettavan rakenteen lämpötilaa ja näin hidastanut vesihöyryn liikkumista diffuusiolla betonissa.

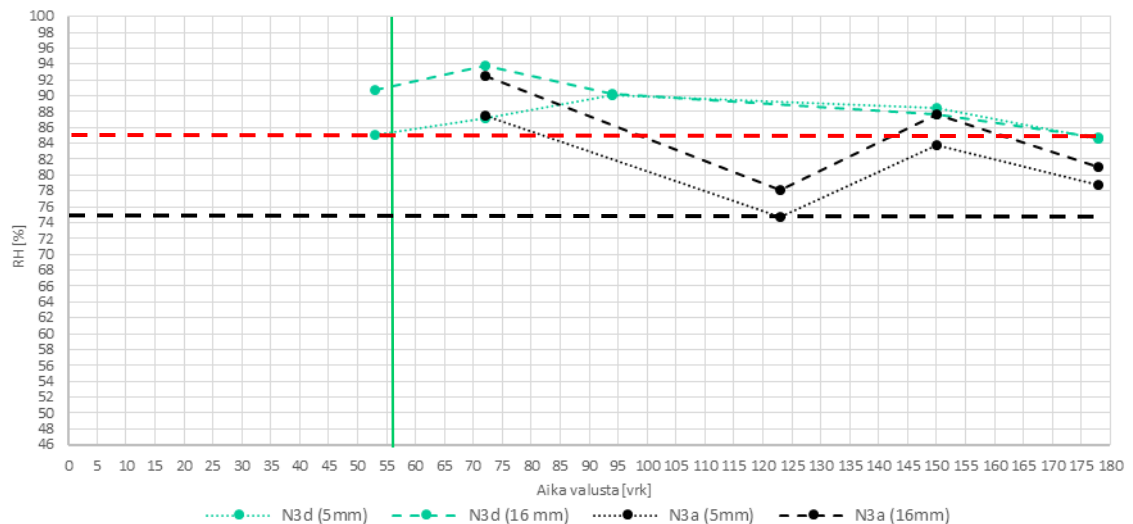
Kosteudenkeruuputkien kohdalla vyöhyke a

Vyöhykkeen a kosteusmittauksilla pyrittiin selvittämään rakenteeseen mahdollisesti syntyvää vaakasuuntaista kosteusjakaumaa. Kosteudenkeruuputken kohdalle tehtiin näytepalamittauksia vain päällystetyille mittausalueille 2a ja 3a. Vyöhykkeiltä a näytepalat otettiin ainoastaan pinnasta ja välisyvyydeltä.

Mittausalueiden 2a ja 3a suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinta- ja välisyvyyksillä on esitetty kuvissa 5.11 ja 5.12. Vertailtavuuden vuoksi kuvaajissa on esitetty myös putkien keskivälin (vyöhyke d) mittaustulokset.



Kuva 5.11. Betonin suhteellisen kosteuden kehitys pinta- ja välisyvyydellä mittausalueen 2 vyöhykkeellä a (putken kohdalla). Mittausalueen 2 päällystysajankohta on korostettu punaisella pystyviivalla. Kiinnitysliiman vaurioitumisen kannalta rakenteen pintaosan kriittisenä kosteuspitoisuutena yleisesti pidetty arvo 85 % RH on korostettu punaisella katkoviivalla. Päällystettävyyden raja-arvo välisyvyydellä 75 % RH on korostettu mustalla katkoviivalla.



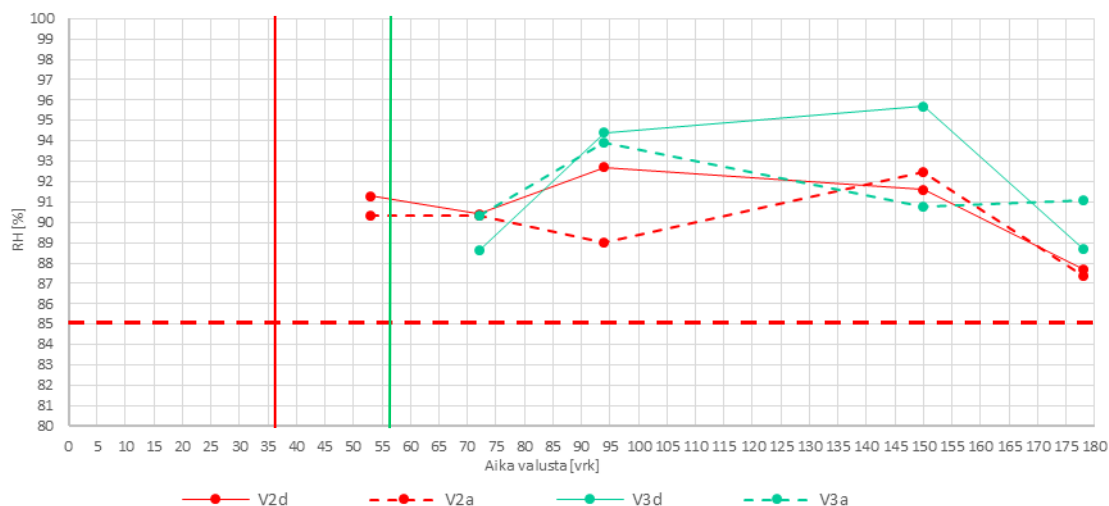
Kuva 5.12. Betonin suhteellisen kosteuden kehitys pinta- ja välisyvyydellä mittausalueen 3 vyöhykkeellä a (putken kohdalla). Mittausalueen 3 päällystysajankohta on korostettu vihreällä pystyviivalla. Kiinnitysliiman vaurioitumisen kannalta rakenteen pintaosan kriittisenä kosteuspitoisuutena yleisesti pidetty arvo 85 % RH on korostettu punaisella katkoviivalla. Päällystettävyyden raja-arvo välisyvyydellä 75 % RH on korostettu mustalla katkoviivalla.

Mittausalueilla 2 ja 3 tehdyissä näytepalamittauksissa ei ole havaittavissa säännönmukaista vaakasuuntaista kosteusjakamaa. Pintaosien kosteuspitoisuuksissa on varsin paljon vaihtelua, mutta keskimäärin mittautulokset olivat lähellä toisiaan kosteudenkeruuputken välissä ja putken kohdalla. Vertailevat kosteusmittausten määrät olivat varsin pienet ja osamittausaluetta b käytettiin ainoastaan päällystetyillä alueilla. Kosteudenkeruuputken päältä ei voitu ottaa mittauksiin mukaan arviointisyvyyttä, koska putken yläpuolella oli vain noin 20...30 mm kerros betonia. Kosteudenkeruuputkien yläpuolelle tehtyjen näytepalamittausten perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä rakenteeseen syntyvästä vaakasuuntaisesta kosteusjakaumasta.

5.1.5 Lattiapäällysteen kiinnitysliimakerroksen kosteuspitoisuus

Kiinnitysliimakerroksen suhteellista kosteutta muovimattopäällysteen alta mitattiin viiltomittausmenetelmällä. Mittalaitteina käytettiin Vaisalan HMP42-kosteusmittapäitä + HMI41-lukulaitetta. Viiltomittauksia tehtiin päällystetyiltä mittausalueilta 2 ja 3 molemmilta mittaussyöhykkeiltä a ja d.

Mittausalueiden 2 ja 3 suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys kiinnitysliimakerroksessa on esitetty taulukossa 5.1. Vertailtavuuden vuoksi taulukossa on esitetty myös vastaavien mittausalueiden betonin pintaosien näytepalamittautulokset.



Kuva 5.13. Lattiapäällysteen kiinnitysliimakerroksen suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys. Päällystysajankohdat on korostettu pystyviivoilla (punainen mittausalue 2 ja vihreä mittausalue 3). Kiinnitysliiman vaurioitumisen kannalta kiinnitysliimakerroksen kriittisenä kosteuspitoisuutena yleisesti pidetty arvo 85 % RH on korostettu punaisella katkoviivalla.

Kiinnitysliimakerroksen suhteellinen kosteus eri mittausalueilla ja mittauskäynneillä vaihtelee 87 % ja 96 % välillä. Tehtyjen viiltomittausten perusteella kosteuden kehityksessä ei ole havaittavissa selkeää nousevaa tai laskevaa trendiä. Kiinnitysliimakerroksen suhteellinen kosteuspitoisuus pysyy mittaustulosten perusteella koko tarkastelujakson ajan reilusti kiinnitysliimakerroksen vaurioitumisen kannalta kriittisenä pidetyn suhteellisen kosteuden raja-arvon 85 % RH yläpuolella.

Taulukko 5.1. Mittausalueiden 2 ja 3 viiltomittausten tulokset sekä vertailun vuoksi vastaavalla ajanhetkellä vastaavilta alueilta mitatut betonin pintakerroksen näytepalamittauksien tulokset.

Koekohde A, viiltomittaukset													
pvm. ja aika valusta		1.9.2017 53 vrk		20.9.2017 72 vrk		12.10.2017 94 vrk		10.11.2017 123 vrk		7.12.2017 150 vrk		4.1.2018 178 vrk	
menetelmä		viilto	np	viilto	np	viilto	np			viilto	np	viilto	np
MP2	A	91,3	86,6	90,3	89,9	89,0				92,5	82,3	87,4	81,3
		13,4		12,7		19,7				20,0		17,3	
	D	91,3	85,4	90,4	89,5	92,7	88,6			91,6	78,5	87,7	83,7
		13,0		12,4		20,8				20,0		17,7	
MP3	A			90,3	87,2	93,9				90,8	83,8	90,8	78,7
				14,6		18,9				23,4		18,7	
	D			88,6	87,2	94,4	90,1			95,7	88,5	88,7	84,6
				12,8		22,0				22,6		20,2	
sisäilma		64,1		78,9		60,7				30,6		45,0	
		17,1		13,0		14,3				20,4		18,2	

Kiinnitysliimakerroksesta mitatut kosteuspitoisuudet ovat johdonmukaisesti korkeampia kuin betonin pintakerroksesta mitatut suhteellisen kosteuden arvot. Keskimääräinen kosteuspitoisuusero on 5,0 %-yksikköä ja suurimmillaan ero on 12,5 %-yksikköä.

Viiltomittausten yhteydessä mitatut kiinnitysliimakerroksen lämpötilat vaihtelevat 12,4 °C ja 23,4 °C välillä. Mittaustulosten perusteella korkeita suhteellisen kosteuden arvoja esiintyy useammin lämpötilan ollessa korkeampi. On mahdollista, että lämpötilavaihteluilla ja rakenteen lämmittämällä on merkittäväkin vaikutus kiinnitysliimakerroksen kosteuspitoisuuteen. Lähdeaineiston perusteella lämmitetyssä lattiassa päällystämisen jälkeen päällysteen alapinnan suhteellinen kosteuspitoisuus nousee nopeammin ja saavuttaa korkeamman maksimikosteuspitoisuuden kuin lämmittämättömässä laatassa (Leivo et. al. 2005).

5.1.6 Aistinvaraiset havainnot tarkastelujakson jälkeen

Mittausjakson päätyttyä (5.1.2018) kiinnitysliiman, tasoitteen ja muovimaton kuntoa sekä tartuntaa arvioitiin erikseen molemmilla mittausalueilla aistinvaraisesti. Aistinvaraisten kokeiden suorittaminen tehtiin seuraavasti:

1. Havainnoitiin mahdollisia värimuunnoksia tai kupruilua muovimaton näkyvillä pinnoilla aistinvaraisesti
2. Tarkasteltiin muovimaton tartuntalujuutta
 - Muovimattoon viillettiin kaksi yhdensuuntaista > 1000 mm pitkää viiltoa 100 mm etäisyydelle toisistaan.
 - Tartuntalujuutta arvioitiin vetämällä muovimattokaista käsin irti alustastaan.
3. Arvioitiin muovimaton alapinnan ja kiinnitysliiman kuntoa havainnoimalla seuraavia asioita paljastuneesta kiinnitysliimakerroksesta ja muovimaton alapinnasta:
 - mahdollisia värimuunnoksia
 - mahdollista silminnähtävää mikrobikasvua
 - mahdollisia poikkeamia mattoliiman tai muovimaton alapinnan koostumuksessa. Mattoliiman koostumusta arvioitiin myös kaapimalla mattoliimaa puukon terällä
 - mahdollista tavanomaisesta poikkeavaa hajua (kemiallista tai mikrobipereistä)

Tehdyt havainnot molemmilta päällystetyiltä mittausalueilta on esitetty seuraavissa kuvissa 5.14 ja 5.15.



Kuva 5.14. Mittausalue 2. Muovimaton pinnassa ei havaittu värimuunnoksia tai kupruilua. Tartuntakokeessa havaittiin, että tasoite oli paikoin lähes irti alustastaan. Niiltä osin kuin murtopinnaksi muodostui pohjusteen ja tasoitteen välinen rajapinta muovimatto irtosi kevyesti kahdella sormella vetäen. Muuten tartuntalujuus oli kohtalainen. Mattoliima- /tasoitekerroksessa havaittiin selkeitä, tummempina alueina havaittuja, värimuunnoksia. Tasoitteen tartunta oli heikointa tummemmilla alueilla. Muovimaton alapinnassa ei havaittu värimuunnoksia eikä silminnähtävää mikrobikasvua. Mattoliiman ja muovimaton alapinnan koostumuksessa ei havaittu poikkeamaa. Mattoliimakerroksessa havaittiin voimakasta kemiallista hajua. Mikrobiperäistä hajua ei havaittu.



Kuva 5.15. Mittausalue 3. Muovimaton pinnassa ei havaittu värimuunnoksia tai kupruilua. Tartuntakokeessa tartuntalujuus oli kohtalainen ja tartunta oli irtivedetyn alueen kohdalla tasainen. Murtopinnaksi muodostui 100% mattoliimakerros. Mattoliima- tai tasoitekerroksessa ei havaittu värimuunnoksia. Muovimaton alapinnassa ei havaittu värimuunnoksia eikä silminnähtävää mikrobikasvua. Mattoliiman ja muovimaton alapinnan koostumuksessa ei havaittu poikkeamaa. Mattoliimakerroksessa havaittiin voimakasta kemiallista hajua. Mikrobiperäistä hajua ei havaittu.

Muovimaton kiinnitysliimassa havaittu voimakas kemiallinen haju viittaa korkean kosteuspitoisuuden aiheuttamaan liiman kemialliseen hajoamisreaktioon. Tarkastelujakson

aikana reaktio ei kuitenkaan ole edennyt niin pitkälle, että mattoliimassa olisi ollut havaittavissa kiinnitysliiman tartunnan pettämistä tai liiman ”saippuoitumista”. Myöskään mikrobikasvuun viittaavaa hajua ei havaittu, mikä oli oletettuakin, sillä lähdekirjallisuuden mukaan mikrobikasvun käynnistyminen alkalisissa olosuhteissa kiinnitysliimakerroksessa vaatii tyypillisesti vuosia kestävän erittäin korkean suhteellisen kosteuspitoisuuden läsnäoloa. Paikoitellen heikko tai olematon tartunta pohjusteen ja tasoitteen välillä mittausalueella 1 johtuu todennäköisesti asennusaikaisista heikoista olosuhteista, esimerkiksi veden lammikoitumisesta pohjusteen pinnalle ennen muovimaton asennusta.

Edellä esitettyjen havaintojen perusteella koejärjestelyissä päällystyshetkellä vallinneet kosteusolosuhteet olivat kiinnitysliiman kemiallisen vaurioitumisen kannalta liian korkeita. Kiinnitysliimakerrokseen vaurioitumiseen ovat voineet liian korkean lähtökosteuden lisäksi vaikuttaa työmaan epävakaa olosuhteet. Liimakerrokseen on voinut ajoittain syntyä kosteuden tiivistymiselle otolliset olosuhteet yläpuolisen ilman lämpötilan vaihdellessa.

5.2 Koekohde B

5.2.1 Kuivumisolosuhteet

Sisäilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta laatan alapuolisessa tilassa seurattiin Testo 174H mittalaitte-tiedonkerääjäyhdistelmällä 20 min tallennusvälillä 18.8.2017 lähtien. Tutkittavan välipohjan yläpuolisen tilan olosuhteita ei seurattu mittalaitteella.

Ulkoilman olosuhdetiedot hankittiin ilmatieteen laitoksen ilmastopalvelusta (Kaisaniemen säähavaintoasema). Ilmatieteen laitoksen datassa tallennusväli on 60 min ja mittausdataa on koko mittausjakson 0...276 vrk ajalta.

Holvin alapuoliset ja ulkoilman olosuhteet on esitetty kuvassa 5.16.

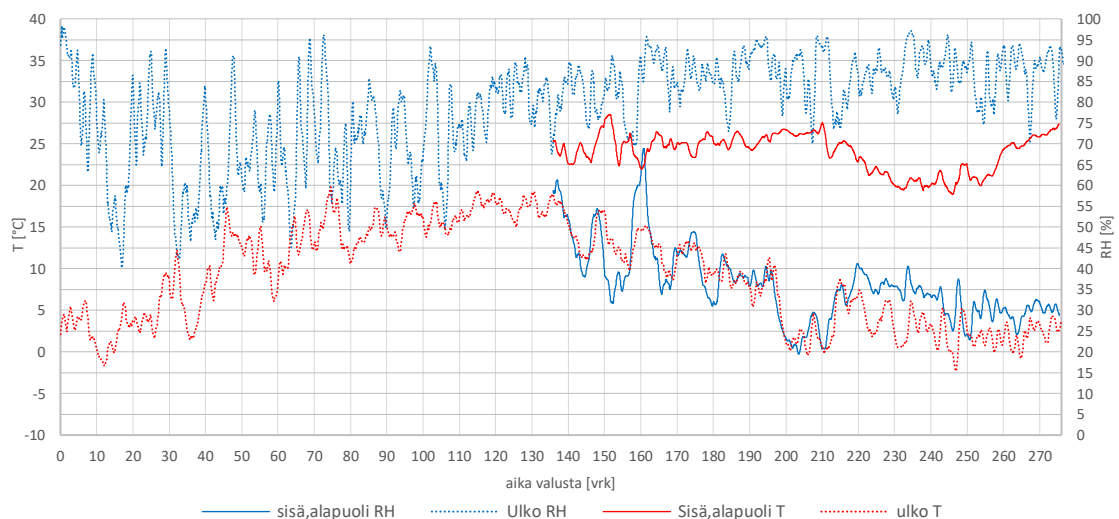
Tarkastelujakson alussa (0...50 vrk) sekä holvin ylä- että alapuolisen tilan olosuhteet ovat olleet ulkoilman olosuhteita vastaavat ja mittausalue on ollut täysin ilman sääsuojaa. Tällä aikavälillä ulkoilman olosuhteiden keskiarvot ovat olleet: $T_{\text{ulko}} = 5,3 \text{ °C}$ ja $RH_{\text{ulko}} = 69 \text{ %}$.

Aikavälin 50...127 vrk alkupuolella holvin alapuolinen tila eristettiin suojaseinillä ulkoilmasta ja tilaan asennettiin rakennuslämmitin. Tältä aikaväliltä ei ole jatkuvaa mittausdataa. Hetkellisten mittausten mukaan alapuolisen tilan lämpötila on ollut noin $23...25 \text{ °C}$. Holvin yläpuolinen tila on ollut pääosan ajasta täysin ilman sääsuojaa. Tällä aikavälillä ulkoilman olosuhteiden keskiarvot ovat olleet noin: $T_{\text{ulko}} = 14,8 \text{ °C}$ ja $RH_{\text{ulko}} = 73 \text{ %}$.

Aikavälin (128...190 vrk) aluksi asennettiin ja käynnistettiin kuivatuslaitteisto mittausalueelle. Kuivatuslaitteistossa oli runsaasti käyntikatkoksia aikavälin alussa, mutta laitteisto on muuten käynyt lyhyitä katkoksia lukuun ottamatta yhtäjaksoisesti koko aikavä-

lin ajan. Tutkittavan välipohjan yläpuolisen tilan yläpuolella on sääsuojana ylemmän holvin muotit. Muottien saumoista ja reuna-alueilta pääsee kuitenkin vettä mittausalueella ja ajoittain holvilla on 0...30 mm vapaata vettä. Sekä holvin ylä- että alapuolisessa tilassa on rakennuslämmitin. Holvin alapuolisen tilan ja ulkoilman olosuhteiden keskiarvot tältä aikaväliltä ovat: $T_{\text{ulko}} = 13,0\text{ °C}$ ja $T_{\text{sisä,alapuoli}} = 24,9\text{ °C}$ sekä $RH_{\text{ulko}} = 84\text{ %}$ ja $RH_{\text{sisä,alapuoli}} = 44\text{ %}$.

Aikavälillä (191...276 vrk) olosuhteissa ei tapahdu merkittävää muutosta edelliseen aikaväliin. Mittausalueen yläpuolisen holvin vesitiiveys paranee vaihteittain ja mittausalueen loppupuolella vettä kulkeutuu vähemmän ja harvemmin mittausalueen holville. Sekä holvin ala- että yläpuolisessa tilassa on rakennuslämmittimet ja kuivatuslaitteisto käy lyhyitä katkoja lukuun ottamatta yhtäjaksoisesti koko aikavälin ajan. Holvin alapuolisen tilan ja ulkoilman olosuhteiden keskiarvot tältä aikaväliltä ovat: $T_{\text{ulko}} = 3,2\text{ °C}$ ja $T_{\text{sisä,alapuoli}} = 23,4\text{ °C}$ sekä $RH_{\text{ulko}} = 87\text{ %}$ ja $RH_{\text{sisä,alapuoli}} = 31\text{ %}$.



Kuva 5.16. Tutkittavan välipohjan alapuolisen tilan sekä ulkoilman lämpötila- ja suhteellisen kosteus mittausjakson ajalta. Kuvaajassa on käytetty mittautulosten 24 h liukuvaa keskiarvoa kuvaajien vuorokausivaihtelun poistamiseksi.

Pyrittäessä tehokkaiisiin kuivumisaikoihin työmaaolosuhteissa, sisäilman suotuisina kuivumisolosuhteina pidetään tavanomaisesti $T \geq 20\text{ °C}$ ja $RH \leq 50\text{ %}$ (BY201). Olosuhteiden ollessa heikommät tai rakenteen kastuessa kuivatusvaiheen aikana ulkopuolisesta vedestä kuivumisaika-arvio voi moninkertaistua.

Mittausalueen alapuolisen tilan kuivumisolosuhteet ovat olleet hyvät ja tasaiset ($T \sim 24\text{ °C}$ ja $RH \sim 35\text{ %}$) alapuolisen tilan rajaamisen ja rakennuslämmittimien käynnistämisen jälkeen eli noin ajanhetkestä 50 vrk lähtien tarkastelujakson loppuun saakka. Kuivuminen alapinnan kautta on ollut todennäköisesti verrattain tehokasta koko tarkastelujakson ajan.

Mittausalueen yläpuolisen tilan kuivumisolosuhteet sen sijaan ovat olleet ulkoilman olosuhteita vastaavat ($T \sim 11\text{ °C}$ ja $RH \sim 71\text{ %}$) kuivatuslaitteiston ja rakennuslämmittimen

asentamiseen saakka eli ajanhetkeen 127 vrk asti. Ulkoilman olosuhteet ovat olleet keskimääräistä vastaavaa ajankohtaa sateisemmat. Yläpinta on kastunut useita kertoja sadevesistä ja ajoittain mittausalueella on ollut kerros sadevettä useampia päiviä. Olosuhteet yläpinnan kautta tapahtuvalle kuivumiselle ovat olleet keskimäärin erittäin heikot. Kuivatuslaitteiston ja rakennuslämmittimen asentamisen jälkeen yläpuolisen tilan lämpötilan nousu on alentanut tilan suhteellista kosteutta, mutta sadevesi on edelleen ajoittain kastellut mittausaluetta ja tästä syystä kuivumisolosuhteet yläpinnan kautta ovat olleet mitausjakson loppuun saakka heikot.

5.2.2 Meno- ja paluuilman olosuhteet ja kosteusvirta

Kosteudenkeruukanaviston meno- ja paluuilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta seurattiin IOliving STR mittalaite-lähetin yhdistelmällä. Mittausdata tallennettiin Android-puhelimen välityksellä pilvipalvelimeen. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella laskettiin meno- ja paluuilman kosteussisällöt. Menoilman anturi sijaitsi menoilman runkokanavassa ja paluuilman anturi sijaitsi paluuilman runkokanavassa. Meno- ja paluuilman anturit on pyritty asentamaan kanavan poikkileikkauksen keskelle.

Mittalaitteet asennettiin kuivatuslaitteiston asennuksen yhteydessä 127 vrk kuluttua valusta. Mittausta jatkettiin tarkastelujakson loppuun saakka. Meno- ja paluuilman kosteussisällön erotuksen ja kanavistossa kiertävän ilmamäärän avulla saatiin määritettyä kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvan kosteuden määrä. Mittalaitteiden tallennusväli vaihteli 6 ja 20 minuutin välillä. Meno- ja paluuilman mittalaitteiden tallennusvälit eivät olleet synkroosissa keskenään vaan tallennusvälit muuttuvat osin sattumanvaraisesti. Tästä syystä kosteusvirran arvojen laskentaa varten mittausdata muokattiin siten, että laskentaan ja kuvaajiin käytettiin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vuorokausikohtaisia keskiarvoja. Kosteusvirta oletettiin nolaksi sähkökatkojen ajalta, jolloin kanavistossa ei kiertänyt ilmaa. Menoilman mittausdatassa on katkos aikavälillä 143...149, jolloin menoilman lämpötila-anturi ei toiminut. Muuten mittausdata on yhtenäistä koko mittausjakson ajalta.

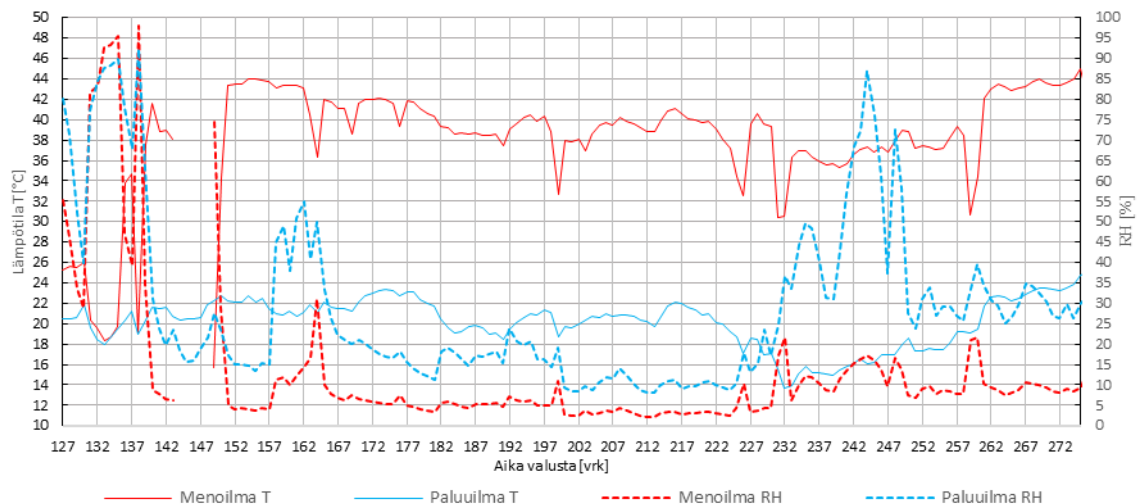
Meno- ja paluuilman lämpötilat sekä suhteelliset kosteudet kuivatuslaitteiston käynnistämisen jälkeen on esitetty kuvassa 5.17.

Aikavälillä 127...149 vrk puhaltimen, kuivaimen tai lämmittimen toiminnassa on merkittävää häiriötä ja lisäksi menoilman mittausanturin tulokset puuttuvat tämän aikavälin viimeisiltä vuorokausilta. Edellä mainituista syistä tällä aikavälillä meno- ja paluuilman lämpötiloissa ja suhteellisessa kosteudessa on runsaasti vaihtelua ja niin sanottua sahausta.

Ajanhetken 149 vrk jälkeen kuivatuslaitteisto käy tarkastelujakson loppuun saakka pääosin häiriöttä ajanhetkillä 164-, 169-, 176-, 199-, 226-, 230-, 231-, 259- ja 260 vrk olleita

sähkökatkoja lukuun ottamatta. Kuivatuslaitteiston käydessä menoilman lämpötilan vuorokausikeskiarvot ovat välillä 36...44 °C ja paluuilman lämpötilan vuorokausikeskiarvot välillä 14...24 °C. Sähkökatkojen aikana menoilman vuorokausikeskiarvoissa on nähtävillä selviä piikkejä alaspäin. Alimmillaan menoilman lämpötilan vuorokausikeskiarvo on noin 30 °C ajanhetkellä 231 vrk. Paluuilman lämpötilojen lasku sähkökatkosten aikana ei ole havaittavissa yhtä selkeästi.

Kuivatuslaitteiston käydessä menoilman suhteellisen kosteuden vuorokausikeskiarvot ovat pääosin välillä RH 2...10 % ja paluuilman suhteellisen kosteuden vuorokausikeskiarvot pääosin välillä RH 8...35 %. Suhteelliset kosteudet seuraavat pääsääntöisesti lämpötilaa siten, että lämpötilan noustessa suhteellinen kosteus laskee. Esimerkiksi sähkökatkojen aikana sekä meno-, että paluuilman suhteellisen kosteuden arvot nousevat selkeästi. Kuivatuslaitteiston käydessä on kuitenkin kaksi ajanjaksoa (157...166 vrk ja 227...250 vrk), joiden aikana meno- ja paluuilman suhteellisessa kosteudessa tapahtuu merkittäviä muutoksia ilman, että lämpötilassa tapahtuisi suurempia muutoksia. Esimerkiksi aikavälillä 157...166 vrk menoilman suhteellinen kosteus nousee edeltävältä tasolta RH 2...6 % tasolle RH 10...31 % ja paluuilman suhteellinen kosteus tasolta RH 14...16 % tasolle RH 38...56 %. Jälkimmäisellä poikkeavalla aikavälillä muutos on samankaltainen.



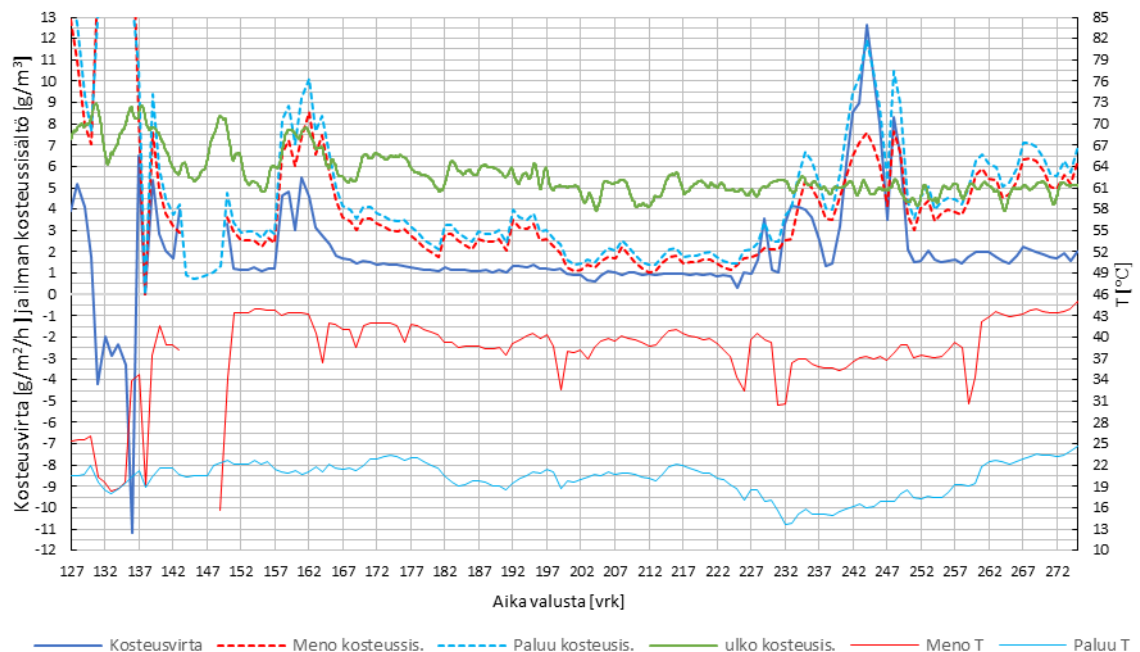
Kuva 5.17. Meno- ja paluuilman lämpötilat sekä suhteelliset kosteudet kuivatuslaitteiston käynnistämisen jälkeen.

Meno- ja paluuilman sekä ulkoilman kosteussisällöt ja kosteudenkeruukanaviston kautta poistuva kosteusvirta on esitetty kuvassa 5.18.

Aikavälin 127...149 vrk käynti- ja mittaushäiriöt näkyvät myös kosteusvirran arvoissa suurena vaihteluna ja osin puuttuvina mittaustuloksina. Kosteusvirran arvot tällä aikavälillä ovat -12...+7 g/m²/h. Kosteusvirran keskimääräinen arvo tällä aikavälillä on negatiivinen.

Ajanhetken 149 vrk jälkeen kuivatuslaitteiston käydessä häiriöttä kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvan kosteusvirran arvo on pääosan ajasta verrattain tasaisesti välillä 1...2 g/m²/h ja pois lukien poikkeavat aikavälit 157...166 vrk ja 227...250 vrk, joiden aikana kosteusvirran arvot nousevat moninkertaisiksi ja korkein vuorokausikeskiarvo 12,6 g/m²/h on ajanhetkellä 244 vrk. Mittausjakson loppupuolella menoilman lämpötilan noustessa kosteusvirran arvoissa on havaittavissa hienoista nousua. Kosteusvirran keskiarvo on 2,1 g/m²/h ja keskiarvo putoaa arvoon 1,4 g/m²/h jos poikkeavat ajanjakson jätetään huomioimatta.

Tarkastelujakson aikana ulkoilman kosteussisältö on välillä 5...9 g/m³ aikavälin alkupuolella ja jälkimmäisellä puoliskolla ulkoilman kosteussisältö asettuu välille 4...6 g/m³. Sekä meno- että paluuilman kosteussisällöt ovat pääosin ulkoilman kosteussisältöä alhaisemmat pois lukien poikkeavat aikavälit ja mittausjakson loppu ajanhetkestä 259 vrk eteenpäin, jolloin menoilman lämpötilassa tapahtuu myös noin 5 °C nousu. Kuvaajasta on nähtävissä, että kuivatuslaitteiston käydessä sekä meno- että paluuilman kosteussisällöt seuraavat pääosin ulkoilman kosteussisältöä. Poikkeuksena ovat jo edellä mainitut poikkeavat aikavälit, joiden aikana meno- ja paluuilman kosteussisällöissä tapahtuu huomattavasti voimakkaampia muutoksia kuin ulkoilman kosteussisällössä.



Kuva 5.18. Kosteudenkeruukanaviston kosteusvirta, meno-, paluu- ja ulkoilman kosteussisällöt sekä meno- ja paluuilman lämpötilat.

Poikkeavien ajanjaksojen aikana tapahtuvalle meno- sekä paluuilman kosteussisältöjen nousulle ei löytynyt suoraan selittävää tekijää mittausdatasta eikä kuivatuslaitteistoon tietoisesti tehdyistä muutoksista. Mittausanturien toimimattomuuskaan tuskin on aiheuttanut poikkeamia, koska samojen anturien lämpötilanäyttämät ovat varsin johdonmukaisia. On mahdollista, että poikkeamat johtuvat ulkoisista virhetekijäistä kuten meno- tai paluuilman kanavan rikkoontumisesta betonivalun ulkopuolella ilmatilassa ja tämän seurauksena

tapahtuvasta ohivirtauksesta ja mahdollisesti kosteamman sisäilman pääsystä kosteudenkeruukanavistoon ja/tai kanavistoon joutuneesta vedestä. Myös puhaltimen sammuminen tai ilmamäärän merkittävä lasku voisi johtaa mitatun kaltaisiin poikkeamiin, ilman että sitä havaittaisiin lämpötilamittauksissa. On epätodennäköistä, että poikkeamien aikana rakenteesta olisi poistunut moninkertaisia määriä betonin rakennekosteutta ilman tietoisia muutoksia kuivatuslaitteistoon tai olosuhteisiin.

Kuivatuslaitteiston kautta poistuneen kosteuden kokonaismäärä kuivatuslaitteiston käydessä (n. 130 vrk) koko mittausjakson ajalta on $6,6 \text{ kg/m}^2$. Rakennepaksumuus huomioiden kumulatiivinen kosteusvirta kosteudenkeruukanaviston kautta betonikuutiometriä kohden on $16,4 \text{ kg/m}^3$.

Kosteusvirran arvot ovat verrattain alhaisia verrattuna aikaisempiin tutkimuksiin ja koe-kohteesta A saatuihin mittaustuloksiin. Ero koe-kohteen A tuloksiin selittyy ainakin osaltaan tiiviimmällä korkeamman lujuusluokan rakennebetonilla, paksummalla rakennepaksumuudella pinta-alaan suhteutettuna pienemmällä kanavistossa kiertävällä ilmamäärällä, myöhemmin valusta aloitetulla kuivatuksella sekä keskimäärin alhaisemmalla menoilman lämpötilalla.

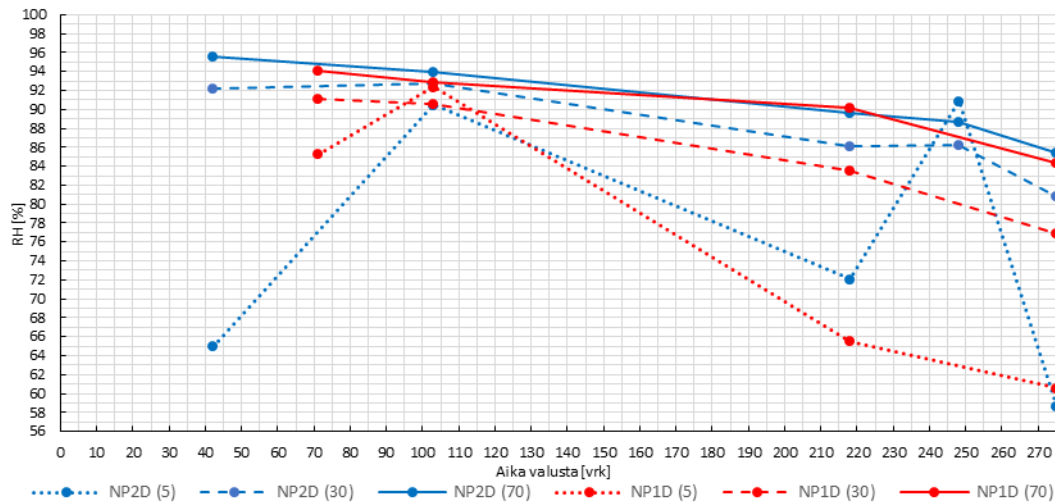
5.2.3 Betonin suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys

Betonin suhteellista kosteutta mitattiin näytepalamittauksilla ja mittaputkimittauksilla. Mittalaitteina käytettiin Vaisalan HMP44-kosteusmittapäitä + HMI41-lukulaitetta. Tar kasteltavalle alueelle tehtiin kaksi rinnakkaista saman kuivain-puhallinyhdistelmän palvelualueella sijaitsevaa mittausaluetta. Mittausalueet sijaitsivat kuivatusjärjestelyiltään, kuivumisolosuhteiltaan ja rakenteeltaan samanlaisilla alueilla. Mittausalueet on esitetty kuvassa 4.8.

Näytepalamenetelmässä mittaussyvyyydet ovat betonin pinta (5 mm), välisyvyys (30 mm) ja arviointisyvyys (70 mm) ja mittaukset on tehty kosteudenkeruuputkien keskivälillä eli vyöhykkeeltä d. Mittaputkimenetelmässä mittaussyvyyydet ovat välisyvyys (30 mm) ja arviointisyvyys (70 mm) sekä lisäksi 160 mm ja 200 mm. Mittaputkimittauksia on tehty useilta eri vaakaetäisyyksiltä suhteessa kosteudenkeruuputkiin (vyöhykkeet a, b, c ja d). Mittaussyvyyydet ja mittausvyöhykkeet on esitetty tarkemmin kappaleessa (0 Mittauspaikat ja mittaussyvyyydet).

NÄYTEPALAMITTAUKSET

Kaikkien näytepalamittausten suhteellisen kosteuden mittaustulokset on esitetty kuvassa 5.19. Selitteessä suluissa oleva lukema on mittaussyvyys millimetreinä rakenteen pinnasta mitattuna. Mittausalueen 1 tulokset on esitetty punaisella viivalla ja mittausalueen 2 tulokset sinisellä viivalla. Mittalaitteiden tiedot ja lukemienottolämpötilat on esitetty liitteen 1 mittauspöytäkirjassa.



Kuva 5.19. Betonin suhteellisen kosteuden kehitys eri mittausvyöhyksillä näytepalamittausten perusteella. Lukemienottolämpötilat eri mittauskerroilla olivat 20,4...21,6 °C.

Arviointisyvyydellä 70 mm ja välisyvyydellä 30 mm rakenteen RH laskee varsin hitaasti kiihtyen kuitenkin selvästi tarkastelujakson loppupuolella. Rakenteen suhteellinen kosteus 218 vrk kuluttua valusta on arviointisyvyydellä vielä noin 90 % ja laskee viimeisen 57 vrk aikana noin 5 %-yksikköä tasolle 85 %.

Välisyvyydeltä mitatut kosteuspitoisuudet ovat arviointisyvyyttä alhaisempia kaikilla mittauskerroilla huolimatta rakenteen pinnoilla ajoittain seisonesta vapaasta vedestä. Tämä viittaa siihen, että sadevesi ei ole imeytynyt betoniin pintakerrosta syvemmälle. Pintakerroksen mittaustuloksissa on huomattavasti enemmän vaihtelua ja mittausalueelta MP2 otetussa korkeassa mittaustuloksessa on havaittavissa päältä kastumisen vaikutus.

Kuten aiemmin on todettu kuivatusolosuhteet ovat olleet ainakin pääosin erittäin heikot rakenteen yläpuolisessa tilassa. Kuivatuslaitteisto on toiminut tehokkaasti ajanhetkestä 149 vrk alkaen ja samoihin aikoihin myös yläpuoliseen tilaan on tuotu rakennuslämmitin. Veden lammikoituminen rakenteen pinnoille on saatu pääosin hallintaan noin 200 vrk kuluttua valusta. Yläpuolisten olosuhteiden parantuminen ja kuivatuslaitteiston käynnistyminen ovat vaikuttaneet kuivumisen nopeutumiseen tarkastelujakson loppupuolella. Mahdollisesti kuivumisen nopeuden muutos on tapahtunut asteittain jo kuvassa 5.19 näkyvää taitekohtaa 218 vrk aiemmin. Kuivatuslaitteiston käynnistymisen ajoilta kuitenkin ole näytepalamittaustuloksia mittausalueille lammikoituneen veden vuoksi.

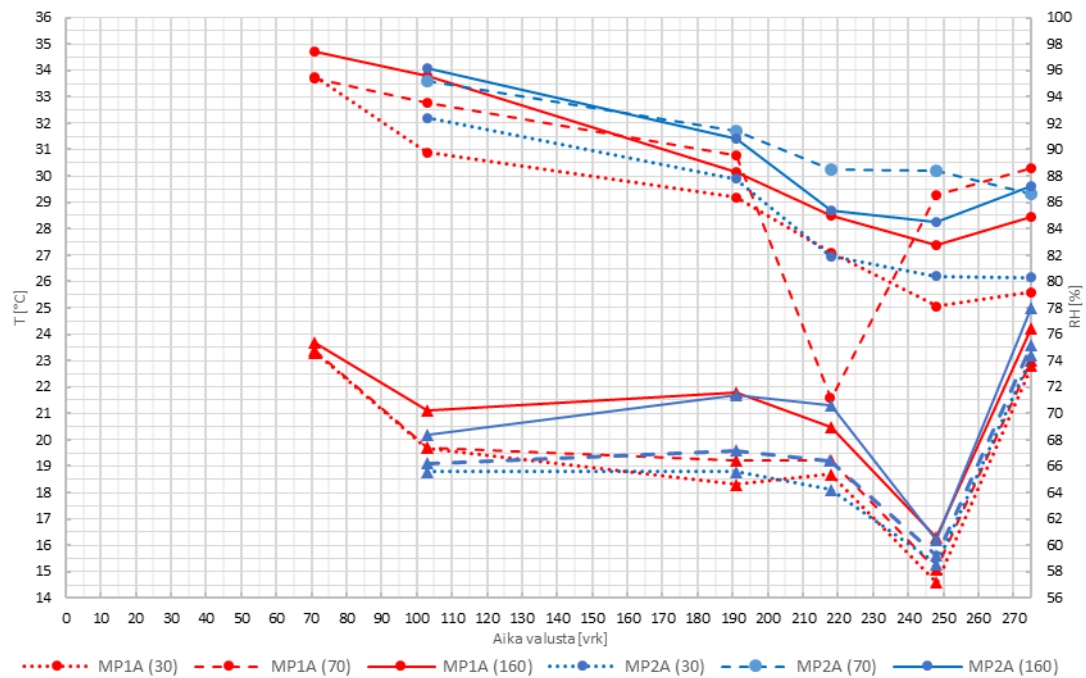
MITTAPUTKIMITTAUKSET

Mittaputkimenetelmällä mitatut suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot on esitetty mittaussyöhykkeittäin (A, B, C ja D) siten, että samaan kuvaajan on piirretty molempien mittausalueiden (1 ja 2) mittaustulokset kaikilta peräkkäisiltä mittauskerroilta. Tulokset on esitetty kuvissa 5.20...5.23. Mittausalueen 1 tulokset on esitetty punaisella viivalla ja mittausalueen 2 tulokset sinisellä viivalla. Viivatyytit vaihtelevat mittaussyvyyden mukaan. Vastaavien mittaussyvyksien RH- että lämpötilakäyrien viivatyytit ovat samoja,

mutta arvopisteet on merkitty RH-käyrissä ympyrä-symbolilla ja lämpötilakäyrien arvopisteet kolmio-symbolilla. Kuvaajien selkeyttämiseksi pystyakselit on skaalattu siten, että lämpötilakäyrät eivät risteä RH-käyrien kanssa vaan lämpötilakäyrät ovat suhteellisen kosteuden käyrien alapuolella.

Mittausvyöhyke a

Vyöhyke A sijaitsee kosteudenkeruuputken kohdalla ja mittausvyöhykkeellä on kolme mittaussyvyyttä 30 mm (välisyvyys), 70 mm (arviointisyvyys) ja 160 mm. Vyöhykkeen a mittaustulokset on esitetty kuvassa 5.20.



Kuva 5.20. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilojen kehitys mittausvyöhykkeellä a. Suhteellisen kosteuden käyrien arvopisteet on merkitty ympyräsymbolilla ja lämpötilakäyrien arvopisteet kolmio- ja neliösymbolilla. Ajanhetkellä 218 vrk valusta pisteestä MP1A (70) mitattu poikkeavan alhainen tulos on todennäköisesti mittausvirhe.

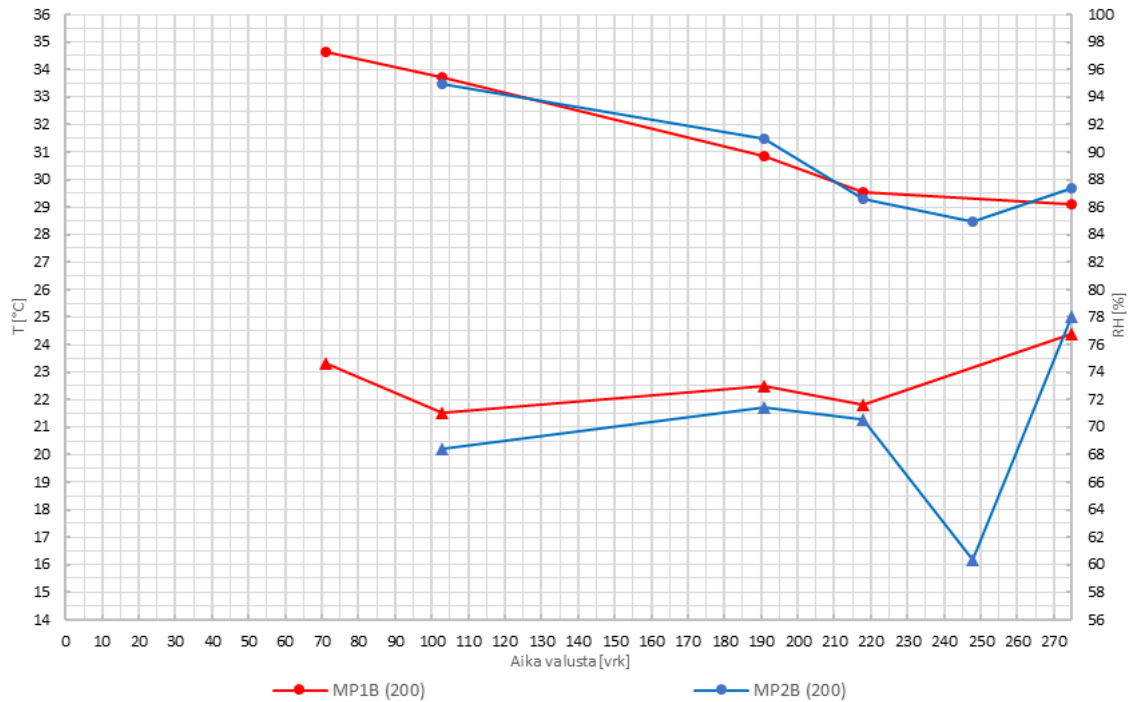
Mittausvyöhykkeen a lämpötiloissa on varsin paljon vaihtelua eri mittauskertojen välillä. Alimmillaan lämpötilat ovat toiseksi viimeisellä mittauskerralla noin 14...16 °C ja ylimmillään viimeisellä mittauskerralla noin 22...25 °C. Mittaustulosten mukaan lähempänä rakenteen yläpintaa olevat lämpötilat ovat alhaisempia kuin syvemmältä rakenteesta mitatut lämpötilat. Saman kaltainen lämpötilajakauma toistuu kaikilla mittauskerroilla ja johtuu osin rakenteen ylä- ja alapuolisten lämpötilaolosuhteiden erosta. Kuten aiemmin on todettu, rakenteen alapuolisessa tilassa on ollut lämmitys päällä jo ensimmäisestä mittauskerrasta lähtien, kun taas rakenteen yläpuoli on ulkoilman olosuhteissa huomattavasti pidempään. Kuivatuslaitteiston käynnistämisen (127 vrk) jälkeen lämpötilaerot kasvavat kuivatuslaitteiston lämmittäessä voimakkaammin lähempänä kosteudenkeruuputkea olevia mittaputkia. Mittaushetken 248 vrk alhaiset lämpötilat viittaavat kuivatuslaitteiston

toimintakatkokseen/-häiriöön, mikä tukee meno- ja paluuilman datassa samalla ajanjaksoilla ilmenneitä poikkeamia. Viimeiselle mittauskerralle lämpötilat nousevat tarkastelujakson korkeimmiksi, mikä johtuu osin kuivatuslaitteiston menoilman lämpötilan nostosta aiempaa korkeammalle tasolle, sekä rakenteen yläpuolisen tilan lämpötilan nostosta. Rakenteen yläpuolisen tilan lämmittäminen kaventaa myös ala- ja yläpuolen lämpötilaeroja ja sitä kautta rakenteeseen syntyvää lämpötilajakaumaa.

Mittausvyöhykkeen A suhteellisten kosteuspitoisuuksien arvot laskevat eri mittausvyöhyksillä kohtalaisen tasaisesti tarkastelujaksolla kuitenkin siten, että mittautulosten mukaan aikavälillä 191...248 vrk kuivuminen on huomattavasti nopeampaa kuin ennen ja jälkeen tämän ajanjakson. Mitatuissa suhteellisen kosteuden arvoissa on havaittavissa selkeää kuitenkin selvää nousua ajanhetkestä 247 vrk viimeiselle mittauskerralle. Kuten aiemmin teoriaosuudessa on todettu betonin lämpötilan nousu aiheuttaa betonin suhteellisen kosteuden nousua, mikä selittää todennäköisesti kosteuspitoisuuden nousun viimeiselle mittauskerralle. Ajanhetkellä 218 vrk arviointisyvyydeltä mitattu poikkeuksellinen alhainen arvo on todennäköisesti mittausvirhe. Suhteellisen kosteuden arvot tarkastelujakson lopussa ovat välisyvyydellä noin 79...80 %, arviointisyvyydellä noin 87...89 % ja 160 mm syvyydellä noin 85...87 %. Huomion arvoista on, että 160 mm syvyydeltä mitatut arvot ovat arviointisyvyyttä alhaisempia viimeisillä mittauskerroilla. Tulokset osoittavat, että kuivuminen on nopeampaa lähempänä kosteudenkeruuputkea.

Mittausvyöhyke b

Vyöhyke b sijaitsee 50 mm etäisyydellä kosteudenkeruuputken keskilinjalta ja mittausvyöhykkeellä on vain yksi mittausvyöhyys 200 mm. Vyöhykkeen mittautulokset on esitetty kuvassa 5.21. Mittausalueen 2 lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittautulos puuttuu toiseksi viimeiseltä mittauskerralta, mikä vääristää mittausalueen 1 käyriä.

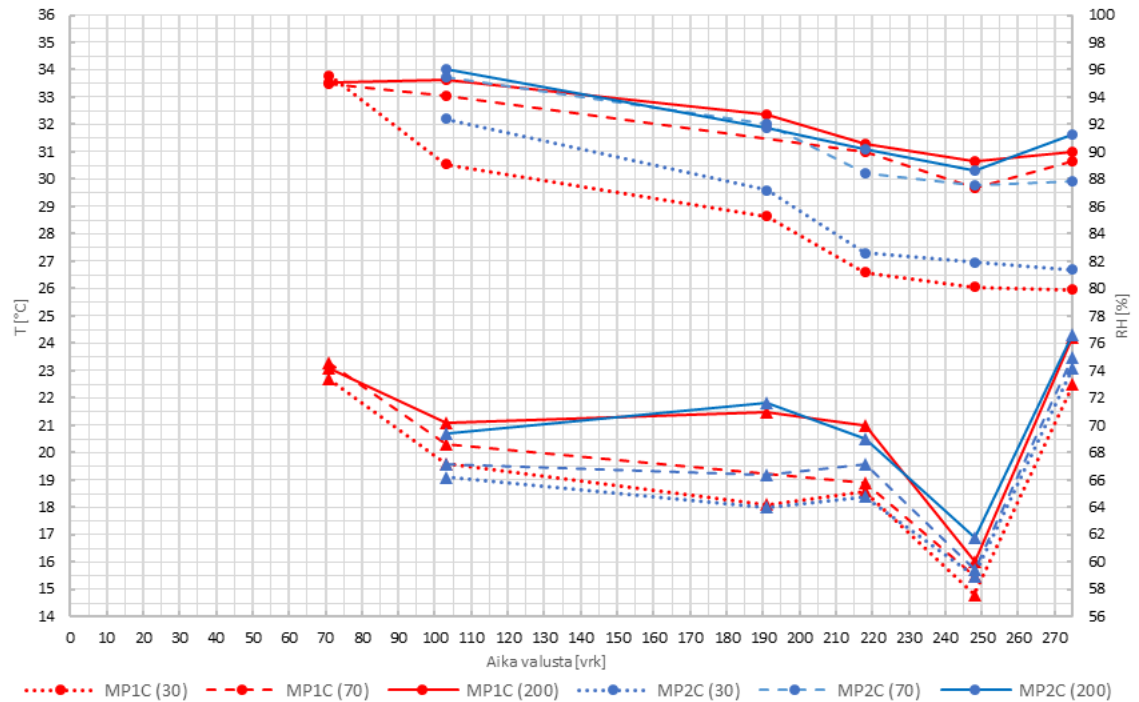


Kuva 5.21. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilojen kehitys mittausvyöhykkeellä b. Suhteellisen kosteuden käyrien arvopisteet on merkitty ympyräsymbolilla ja lämpötilakäyrien arvopisteet kolmiosisymbolilla.

Mittausvyöhykkeen b lämpötilat ovat samankaltaisia kuin vyöhykkeen a mittau tulokset. Lämpötiloissa näkyy poikkeuksellisen alhainen lämpötila (16 °C) toiseksi viimeisellä mittau skerralla ja korkeimmat lämpötilat (24...25 °C) viimeisellä mittau skerralla. Kun jätetään mittausalueen 1 puuttuva tulos huomiomatta, suhteellisen kosteuden käyrät käyttäytyvät samankaltaisesti kuin vyöhykkeellä a. Suhteellinen kosteus laskee nopeimmin aikavälillä 191...248 vrk ja nousee kohti viimeistä mittau skertaa.

Mittausvyöhyke c

Vyöhyke c sijaitsee 100 mm etäisyydellä kosteudenkeruuputken keskilinjalta ja mittausvyöhykkeellä on kolme mittaus syvyyttä 30 mm (välisyvyys), 70 mm (arviointisyvyys) ja 200 mm. Mittausvyöhykkeen c mittau tulokset on esitetty kuvassa 5.22.

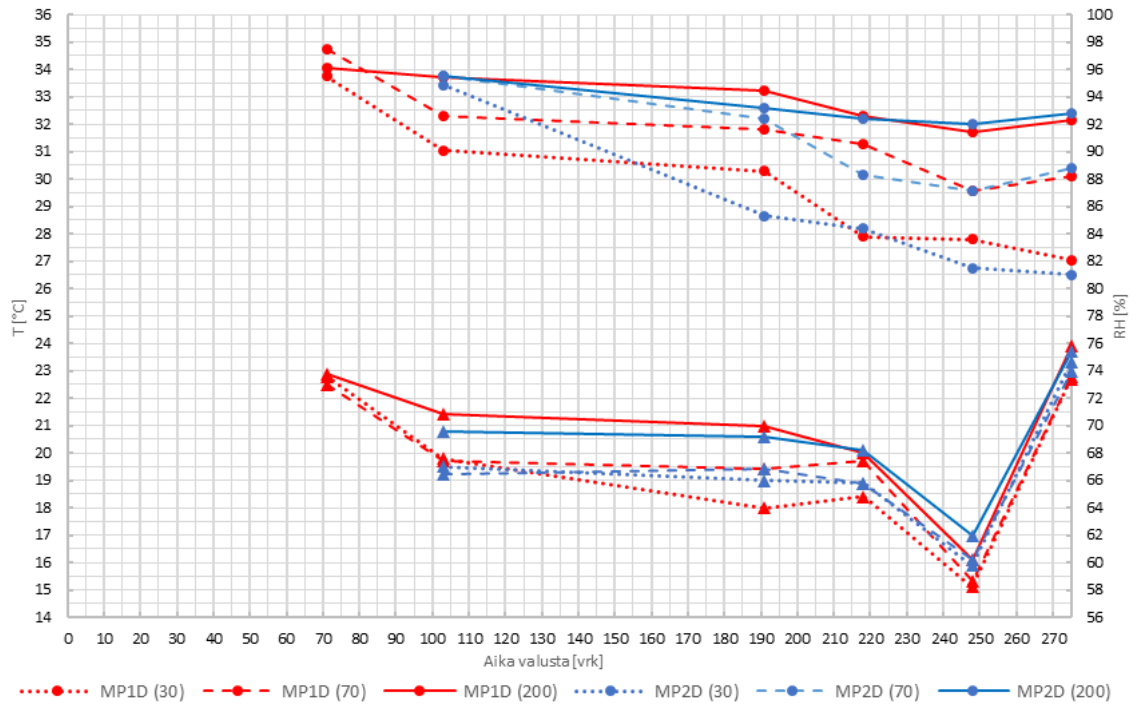


Kuva 5.22. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilojen kehitys mittausvyöhykkeellä c. Suhteellisen kosteuden käyrien arvopisteet on merkitty ympyräsymbolilla ja lämpötilakäyrien arvopisteet kolmiosisymbolilla.

Mittausvyöhykkeen c lämpötiloissa toistuvat samat trendit kuin vyöhykkeen a lämpötiloissa. Myös suhteellisen kosteusarvoissa on trendit, jotka ovat samansuuntaiset kuin mittausvyöhykkeellä a, mutta kosteusarvojen nousu viimeiselle mittauskerralle ei näy yhtä voimakkaasti kuin vyöhykkeellä a. Suhteellisen kosteuden arvot tarkastelujakson lopussa ovat välisyvyydellä noin 80...82 %, arviointisyvyydellä noin 87...89 % ja 200 mm syvyydellä noin 90...92 % eli väli ja arviointisyvyyden osalta samaa tasoa kuin mittausvyöhykkeellä a. Syvimmällä rakenteessa olevan mittausvyöhykkeen (200 mm) arvot ovat selkeästi korkeampia kuin vyöhykkeellä a syvimmän mittausvyöhykkeen (160 mm), mikä selittyy eri mittausvyöhykkeillä ja kauempana kosteudenkeruuputkesta olevalla sijainnilla.

Mittausvyöhyke d

Mittausvyöhyke d sijaitsee 200 mm etäisyydellä kosteudenkeruuputken keskijalta eli kahden kosteudenkeruuputken puolivälissä. Vyöhykkeellä on kolme mittausvyöhykettä 30 mm (välisyvyys), 70 mm (arviointisyvyys) ja 200 mm. Mittausvyöhykkeen d mittausloket on esitetty seuraavassa kuvassa 5.23.



Kuva 5.23. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilojen kehitys mittausvyöhykkeellä d. Suhteellisen kosteuden käyrien arvopisteet on merkitty ympyräsymbolilla ja lämpötilakäyrien arvopisteet kolmiosisymbolilla.

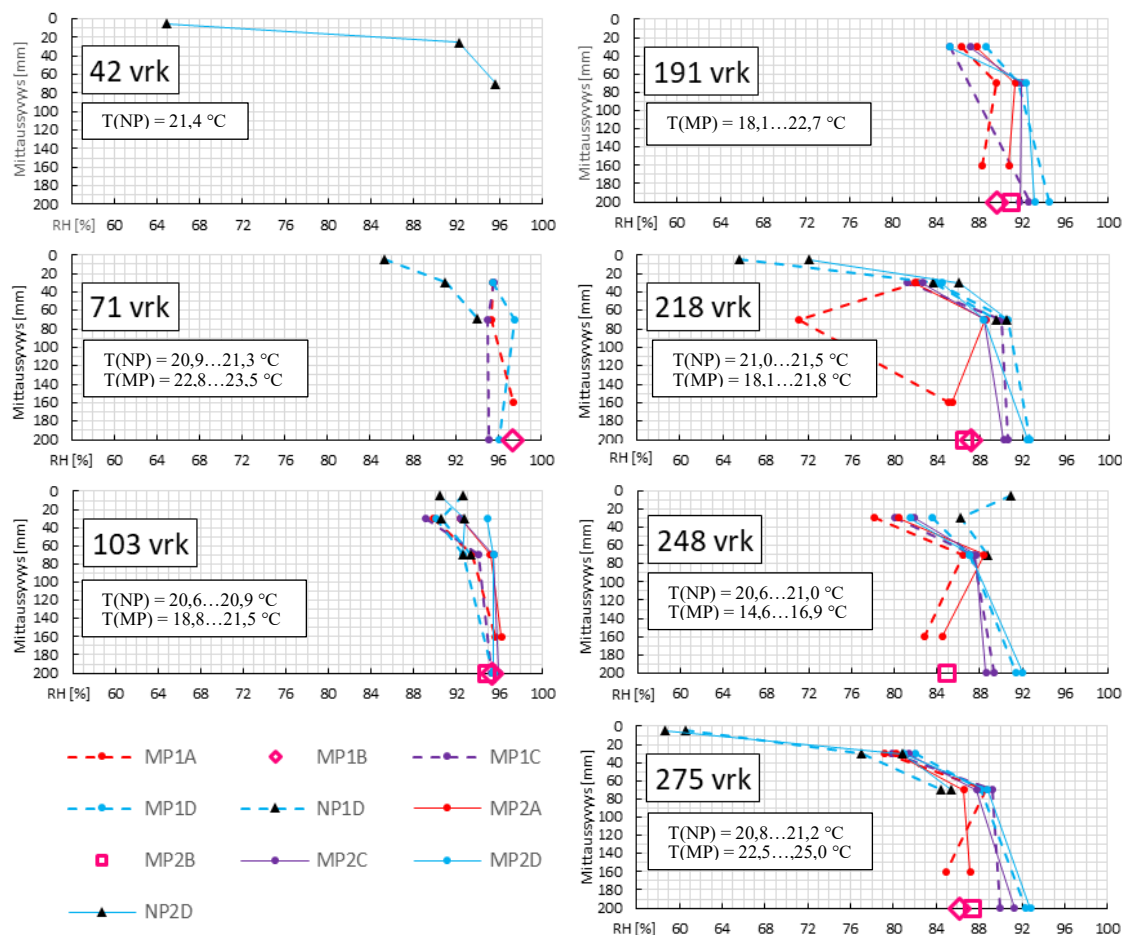
Mittausvyöhykkeen d lämpötiloissa toistuvat jälleen samat trendit kuin vyöhykkeillä a ja c. Lämpötiloista on kuitenkin havaittavissa, että mittauskerroilla 191 vrk, 218 vrk ja 275 vrk lämpötilat välisyvyyden ja 200 mm välillä ovat lähempänä toisiaan kuin lähempänä kosteudenkeruuputkia olevilla pystylinjoilla. Lämpötilaeroa on kuitenkin nähtävissä myös putkien välissä rakenteen ala- ja yläpuolisen lämpötilaeron takia.

Myös suhteellisen kosteuden osalta on osittain nähtävissä samat trendit kuin aiemmin esitettyjen tulosten osalta. Suhteellisen kosteuden arvot laskevat nopeimmin välillä 191...245 vrk ja viimeiselle mittauskerralle tapahtuu selkeää nousua, mikä selittyy todennäköisesti korkeammilla lämpötiloilla. Mittausvyöhykkeen d suhteellisen kosteuspitoisuuden arvot eri mittausvyöhyksiltä erottuvat selkeästi toisistaan tarkastelujakson loppupuolella. Välisyvyydeltä mitatut arvot ovat alhaisimpia, noin 80...82 %, arviointisyvyydeltä mitatut arvot selkeästi korkeampia noin 88...89 % ja 200 mm syvyydellä taas edellistä korkeampia noin 92...93 %.

5.2.4 Kosteusjakaumien kehittyminen eri mittausvyöhykkeillä

Tässä luvussa tarkastellaan pystysuuntaisten kosteusjakaumien kehittymistä eri pystylinjoilla sekä vertaillaan eri mittausmenetelmillä saatuja mittautuloksia. Suhteellisen kosteuden mittautuloksista on laadittu pystysuuntaiset kosteusjakaumat erikseen jokaiselta mittauskerralta. Sekä näytepala että mittaputkimenetelmällä saadut tulokset on yhdistetty samoihin kuvaajiin. Vertaillaessa eri mittausmenetelmien mittautuloksia on huomioitu, että näytepalamittaukset on otettu kosteudenkeruuputkien välistä mittausvyöhykkeeltä d,

joten näytepalamittausten vertailu on tehty ensisijaisesti mittausvyöhykkeen d mittaputkimenetelmän tuloksiin. Kosteusjakaumat on esitetty kuvassa 5.24. Jakaumissa ei ole huomioitu rakenteen alaosan (200-400 mm) kosteusjakaumaa, koska siitä osasta rakennetta ei ole mittaustuloksia.



Kuva 5.24. Näytepala- ja mittaputkimittauksista kootut kosteusprofiilit. Kunkin mittauskerran kuvaajaan on koottu kaikki kyseisellä mittauskerralla mitatut betonin suhteellisen kosteuden tulokset. Mittauslämpötilat on esitetty kuvaajien yhteydessä tekstimuodossa. Pystyakselilla on syvyys rakenteen yläpinnasta ja vaaka-akselilla suhteellinen kosteus. Akselit on skaalattu samoiksi kaikissa kuvaajissa siten, että eri mittauskertojen profiileja voidaan vertailla keskenään. Viivatyypit on valittu siten, että mittausalueen 1 käyrät ovat katkoviivalla ja mittausalueen 2 käyrät jatkuvalla viivalla. Käyrien värit on valittu mittausvyöhykkeittäin siten, sinisellä kuvatut käyrät ovat kauimpana kosteudenkeruuputkesta (vyöhyke d), punaiset käyrät lähimpänä kosteudenkeruuputkea (vyöhyke a) ja muut värit näiden väliltä vyöhykkeiltä b ja c.

Mittaputkimittausten mittausvyöhykkeen d tulokset ovat pääosin varsin lähellä näytepalamittausten tuloksia yhteisillä mittausvyvyyksillä (välisyvyys 30 mm ja arviointisyvyys 70 mm). Arviointisyvyydellä eri menetelmillä mitattujen suhteellisen kosteuspitoisuuden arvojen ero pysyy alle 3,5 %-yksikön sisällä lukuun ottamatta viimeisen mittauskerran tuloksia. Välisyvyydellä eri mittausmenetelmien välillä on hieman suurempia eroja, mutta välisyvyydellä myös mittaputkimenetelmällä mitatuissa arvoissa on enemmän hajontaa kuin arviointisyvyydellä. Hajontaan voi vaikuttaa esimerkiksi rakenteen yläpinnan

epätasainen kastuminen ja lisäksi välisyvyydellä pienikin epätarkkuus mittaussyvytydessä vaikuttaa mitattuihin arvoihin enemmän kuin syvemmällä rakenteessa. Viimeisellä mittauskerralla mittaputkimittausten tulokset ovat molemmilla syvyyksillä noin 2...5 %-yksikköä korkeampia kuin näytepalamittausten tulokset. Ero johtuu todennäköisesti rakenteen korkeasta lämpötilasta mittaputkimittauksessa.

Mittausvyöhykkeen d pystysuuntainen kosteusjakauma kehittyy, kuten tavanomaisen yläpinnan kautta kuivuvan rakenteen kosteusjakauma. Rakenteen kuivuminen on merkittävintä pintojen kautta, eikä kosteudenkeruuputken vaikutusta kosteusjakaumaan ole havaittavista. Yläpinnan kautta tapahtuva kastuminen näkyy pintaosien mittaustuloksissa mittauserroilla 103 vrk ja 248 vrk. Pintaosien kosteuspitoisuuden kehitystä arvioitaessa tulee huomioda, että näytepalamittauksia ei ole voitu ottaa ajanhetkellä jolloin rakenteen pinnalla on ollut vapaata vettä eli mittauserrojen 103 vrk ja 218 vrk. Tällöin pintaosien kosteuspitoisuus on todennäköisesti vaihdellut merkittävästi.

Mittausvyöhykkeellä c kosteusjakauma taittuu hieman jyrkemmäksi siten, että suhteellinen kosteuspitoisuus ei juurikaan nouse mentäessä arviointisyvyydeltä 200 mm syvyydelle. Kuivatuslaitteiston vaikutus on nähtävissä siten, että vyöhykkeen c mittaustulokset 200 mm syvyydellä ovat hieman matalampia tarkastelujakson viimeisillä mittauserroilla kuin vyöhykkeellä d.

Mittausvyöhykkeellä c kosteusjakauma taittuu selkeästi jyrkemmäksi siten, että suhteellinen kosteuspitoisuus laskee mentäessä arviointisyvyydeltä 160 mm syvyydelle. Kuivatuslaitteiston vaikutus on nähtävissä selkeästi siten, että vyöhykkeiden a ja b mittaustulokset syvyyksillä 160 mm ja 200 mm poikkeavat selkeästi vyöhykkeiden a ja c mittaustuloksista.

Edellä kuvatut erot pystysuuntaisissa kosteusjakauksissa tarkoittavat, että rakenteeseen syntyy vaakasuuntainen kosteusjakauma siten, että rakenne on selkeästi kuivempi kosteudenkeruuputkien läheltä kuin putkien keskeltä. Vaakasuuntainen jakauma hahmottuu kuvan 5.24 kuvaajista siten, että punaiset käyrät ovat syvemmällä rakenteessa selkeästi sinisten käyrien vasemmalla puolella. Ero viimeisillä mittauserroilla mittaussyvytydellä 200 mm on vyöhykkeiden b ja d välillä noin 6...7 %-yksikköä. Arviointi- ja välisyvytydellä ero pystylinjojen välillä ei ole yhtä selkeä. Vyöhykkeen a tulokset näillä syvyyksillä ovat keskimäärin noin 1 %-yksikköä alhaisempia kuin vyöhykkeellä d.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Koejärjestelyiden ja mittauksen onnistuminen

Kokeellisen osuuden päätavoitteena oli tarkastella järjestelmän kuivatuskapasiteettia ja pyrkiä arviomaan järjestelmän vaikutuksia betonirakenteiden kuivumisaikoihin sekä päällystettävyyssajankohtaan. Koekohteessa A mittauskäyttöön saadussa tilassa ollut tavanomainen maanvastainen alapohjarakenne ja väljä rakennusaikataulu mahdollistivat tutkimussuunnitelman mukaisten lattianpäällystekokeiden toteuttamisen. Koekohde B ei täysin vastannut tutkimussuunnitelmassa koekohteille määritettyjä tavoitteita, mutta kohteessa saatiin kuitenkin suoritettua kosteusmittaukset pääosin onnistuneesti ja mittauksen perusteella pystyttiin määrittämään rakenteeseen syntyvää kosteuskenttää kuivumisen eri vaiheissa.

Mittausalueet jäivät osin vajaaksi, koska suunniteltuja verrokkialueita ei voitu hyödyntää kummassakaan koekohteessa työmaiden aikataulumuutoksista johtuen. Tosin koekohteessa A verrokkialue saatiin rajattua noin viikon kuluttua kuivatusjärjestelmän käynnistämisestä tulppaamalla osa kuivatuspiireistä. Puuttuvista tai puutteellisista verrokkialueista johtuen kuivatusjärjestelmän vaikutusta rakenteen kuivumisaikaan ei voitu luotettavasti arvioida. Koekohteessa A olisi tulosten tulkinnan kannalta ollut hyvä olla verrokkialueet ilman kuivatusjärjestelmää myös päällystetyille alueille. Tosin lähdekirjallisuuden perusteella oletuksena voidaan pitää, että tavanomaisessa rakenteessa päällystämisen jälkeen haihtuminen pinnan kautta estyy ja kosteusjakauma tasaantuu päällystämishetkellä arvostelusyvyydellä vallinneen suhteellisen kosteuden tasolle.

Merkittävimmät koe- ja mittausjärjestelyihin liittyvät haasteet kohdistuivat kuivatuslaitteiston käynnin seurantaan ja jatkuvakestoisiin seurantamittauksiin. Kuivatuslaitteiston toiminta-aika koekohteessa A oli katkonainen ja työmaan aikataulujen vuoksi kuivatus jouduttiin lopettamaan kesken. Mikäli kuivatusta olisi jatkettu pidempään, suhteellinen kosteuspitoisuus päällysteen alla olisi saatu huomattavasti alhaisemmaksi. Koekohteen A meno- ja paluuilman mittausdatasta tuli erittäin katkonaista sähkönsyöttö- ja mittausteknisistä ongelmista johtuen. Tallentuneiden mittausjaksojen perusteella saatiin kuitenkin kohtalainen käsitys kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvan kosteuden määrästä. Koekohteen B osalta saatiin hyvä kokonaiskäsitys kanaviston kautta poistuvan kosteuden määrästä. Myös sisäilman olosuhteita tallentavien mittalaitteiden kanssa oli jonkin verran mittausteknisiä ongelmia eikä osa mittalaitteista tallentanut olosuhteita koko mittausjakson ajalta.

Mittauksen suorittamista ja erityisesti tulosten tulkintaa häiritsivät tarkasteltavien rakenteiden toistuvat kastumiset molemmissa kohteissa sekä pitkälti ulkoilman olosuhteita vas-

taavat vaihtelevat olosuhteet erityisesti koekohteessa B. Kastuminen oli mittauskäyneillä tehtyjen havaintojen perusteella välillä paikallista ja erityisesti koekohteessa A ajoittain myös laaja-alaisempaa. Kastumiset ja epävakaa kuivumisolosuhteet johtuivat epätavanomaisen sateisesta ajanjaksosta mittausjakson aikana sekä työmaiden muuttuneista aikatauluista vesikattotöiden osalta.

Koejärjestelyissä ja mittauksissa ilmenneet ongelmat johtuivat pitkälti vaihtelevista työmaaolosuhteista, työmaiden muuttuneista aikatauluista sekä mittalaitteiden ongelmista. Pitkäkestoisten työmaaolosuhteissa tapahtuvien seuranta- ja rakennekosteusmittausten täydellinen onnistuminen vaatii huolellista suunnittelua ja valmistautumista, säännöllisiä tarkastuskäyntejä työmaalla, jatkuvaa kommunikointia työmaahenkilökunnan kanssa ja nopeaa reagointia työmaalla tapahtuviin muutoksiin. Etäluettavilla meno- ja paluuilman mittalaitteilla, joita oli käytössä kohteessa B, havaittiin kuivatuslaitteiston ongelmat reaaliajassa ja niiden käytöllä olisi saavutettu etuja myös koekohteessa A. Edellä luetelluilla toimintatavoilla osa mittausjakson ongelmista olisi voitu välttää, mutta koekohteet sijaitsivat etäällä tutkimuksen tekijän asuinkunnasta ja tämän vuoksi ylimääräiset tarkastuskäynnit ja nopea reagointi eivät olleet mahdollisia diplomityölle varatun ajankäytön puitteissa.

6.2 Mittaustulosten pohdinta ja jatkotutkimustarpeet

Kuivuminen kosteudenkeruukanaviston kautta

Kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvan kosteusvirran arvot vaihtelivat koekohteessa A pääosin välillä 4 ja 10 g/m²/h ja koekohteessa B pääosin välillä 1...2 g/m²/h. Koekohteesta A mitatut kosteusvirran arvot vastaavat hyvin aiemmissa kuivatusjärjestelmän toimintaa tarkastelevissa tutkimuksissa (Ahvenainen 2016 ja Oksanen 2017) vastaavilla kuivatusjärjestelyillä saatuja kosteusvirran arvoja, kun taas koekohteessa B kosteusvirran arvot olivat huomattavasti edellä mainituissa tutkimuksissa mitattuja arvoja alhaisempia. Toisaalta verrattaessa kosteudenkeruukanaviston kautta tässä ja muissa tutkimuksissa mitattuja kosteusvirran arvoja ovat ne huomattavasti korkeampia kuin (Lindberg et al, 2002) aikavälillä 30...90 vrk jälkihoidon lopettamisesta mitatut betonikoekappaleiden pinnan kautta haihtuvan kosteusvirran arvot (0,4...0,9 g/m²/h).

Tutkimuksessa havaittiin, että lämpötilan nousu tehosti selvästi kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvaa kosteusvirtaa eikä tarkastelujakson aikana havaittu kummassakaan kohteessa merkittävää kosteusvirran alenemista kuten aiemmissa tutkimuksissa (Leivo et al. 2015). Koekohteessa A tarkasteltua lattian päällystämisen välitöntä vaikutusta kosteusvirran suuruuteen ei voitu arvioida luotettavasti katkonaisen mittausdatan vuoksi.

Koekohteiden välisille eroille kosteusvirran arvoissa on useita selittäviä tekijöitä, joiden vaikutusta ei voida tutkimuksen perusteella täsmällisesti eritellä. Selkeitä eroja selittää todennäköisesti ainakin seuraavat tekijät:

- **Menoilman lämpötila.** Koekohteen A keskimääräinen menoilman lämpötila oli noin 6 °C korkeampi kuin koekohteessa B. Menoilman lämpötilalla on aikaisemmissa tutkimuksissa havaittu olevan merkittävä vaikutus kosteusvirran suuruuteen. Korkeampi menoilman lämpötila nostaa kiertävän ilman kosteudensitomiskapasiteettia ja nostaa lisäksi rakenten lämpötilaa.
- **Rakenteen lämpötila.** Tässä tutkimuksessa ei erikseen mitattu rakenteiden lämpötiloja. Rakenteen lämpötilalla on aiemmissa tutkimuksissa havaittu olevan merkittävä vaikutus kosteusvirran suuruuteen. Koekohteen B rakenteen yläpinta oli lähes koko mittausjakson ajan ulkoilman olosuhteissa, kun taas koekohteen A rakenne oli paremmissa lämpötilaolosuhteissa. Koekohteen B massiivinen välipohjarakenne lämpenee kuivatuslaitteiston vaikutuksesta hitaammin kuin koekohteen A ohut maanvarainen alapohjalaatta.
- **Kuivatuslaitteiston käynnistämisaikajako.** Koekohteessa A kuivatuslaitteisto käynnistettiin 44 vrk kuluttua valusta ja koekohteessa B 127 vrk kuluttua valusta.
- **Betonilaatu.** Koekohteessa A käytettiin tavanomaista lattiabetonia ja koekohteessa B korkeamman lujuusluokan rakennebetonia. Tiedetään, että alhaisemman vesi-sementtisuhteen betoneilla betonimassaan sekoitettu vesimäärä on alhaisempi, kemiallisesti sitoituvan kosteuden määrä on suurempi ja betonin vesihöyrynläpäisevyys ja kapillaarisuus ovat alhaisempia. Betonilaadun vaikutuksesta kosteudenkeruukanaviston kautta poistuvan kosteusvirran suuruuteen on selkeää tarvetta jatkotutkimukselle.
- **Kosteudenkeruukanaviston ilmamäärä.** Koekohteessa A käytetty ilmamäärä oli lattiapinta-alan suhteutettuna noin 20 % suurempi kuin koekohteessa B.

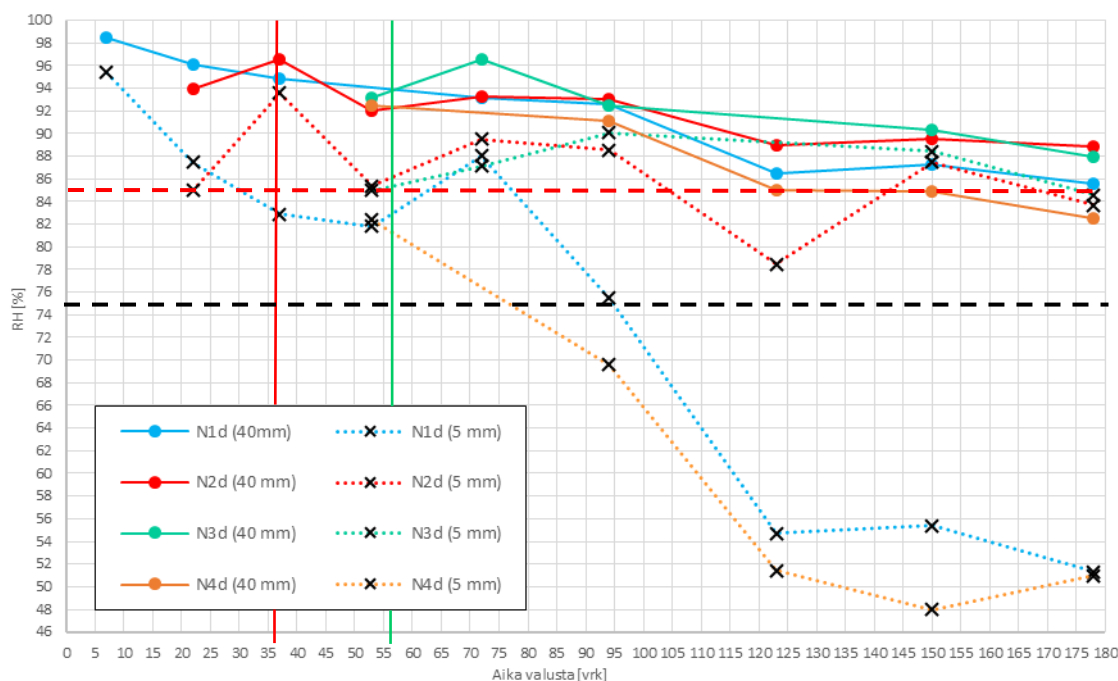
Tehtyjen mittausten ja kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että kosteudenkeruukanaviston kautta poistuva kosteusvirta on suurempi kuin pintojen kautta haihtuva kosteusvirta. Kuivatusjärjestelmän kuivatuskapasiteetin voidaan siten olettaa olevan betonin kuivumisen kannalta merkittävä. Eri muuttujien vaikutuksesta on kuitenkin vielä tarvetta lisätutkimuksille, jotta kuivatusjärjestelmä voidaan optimoida toimimaan mahdollisimman tehokkaasti.

Betonin suhteellisen kosteuden kehitys

Näytepalamittauksilla tarkasteltiin betonin suhteellisen kosteuden kehitystä molemmissa koekohteissa. Koekohteessa B tarkasteltiin lisäksi mittaputkimittauksilla kosteuskentän tarkempaa jakaantumista rakenteen poikkileikkauksessa.

Koekohteessa A suhteellinen kosteus arviointisyvyydellä saavuttaa raja-arvon 85 % RH noin 123 vrk iässä kuivatetulla ja päällystämättömällä alueella N4d. Päällystetyillä ja

kuivatetuilla alueilla (N2d ja N3d) tai verrokkialueella (N1d) ei saavuteta raja-arvoa mittausjakson aikana. Betonin pintakerroksessa päällystämättömillä alueilla pintakerros kuivuu noin tasolle 50 % RH ja päällystetyillä alueilla pintakerroksen suhteellinen kosteus on mittausjakson lopulla tasolla 85 % RH. Kuvassa 6.1 on esitetty näytepalamittausten tulokset betonin pintakerroksessa ja arviointisyvyydellä kosteudenkeruuputkien välissä koekohteesta A.



Kuva 6.1. Kosteudenkeruuputkien puolivälistä mitatut näytepalamittaukset koekohteesta A. Mittausalueet N2d ja N3d ovat päällystettyjä alueita. Mittausalue N1d on verrokkialue (ei kuivatusta eikä päällystystä). Mittausalue N4d on päällystämätön, mutta kuivatettu alue. Päällystysajankohdat on kuvattu punaisella (mittausalue 2) ja vihreällä (mittausalue 3) pystyviivoilla. Vaakasuuntaisilla katkoviivoilla on kuvattu raja-arvoja 85 % RH ja 75 % RH.

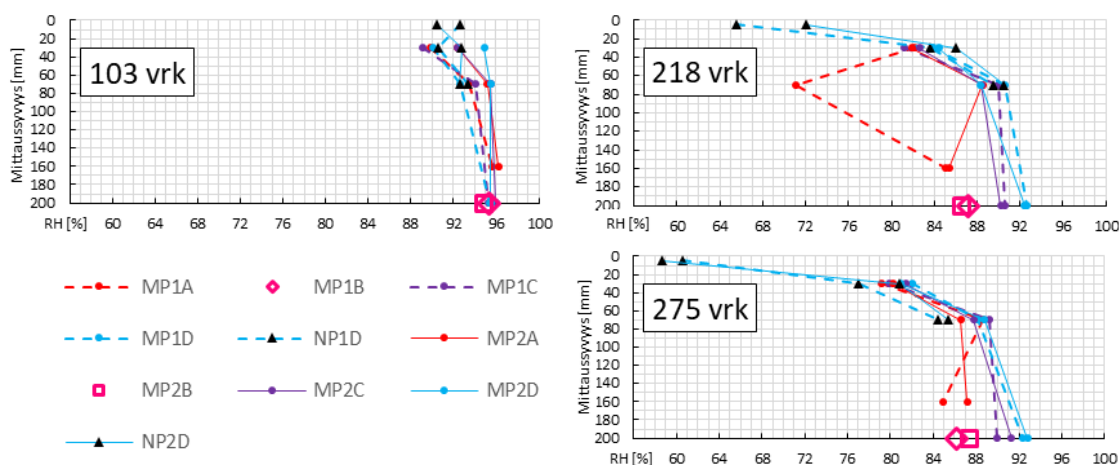
Lähdekirjallisuuden mukaan (Merikallio et al. 2007) tavanomaisen päällystetyn maanvastaisen alapohjarakenteen suhteellinen kosteus tasaantuu täysin vesihöyrytiiviillä lattiapääällysteillä koko rakenteen paksuudelta päällystämishetkellä arviointisyvyydellä vallinneeseen tasoon. Kaikki lattiapääällysteet läpäisevät kuitenkin jonkin verran vesihöyrymuodossa olevaa kosteutta, joten kosteuspitoisuus tasaantuu käytännössä jonkin verran alle arviointisyvyydellä vallinneen tason.

Koekohteen A näytepalamittauksien perusteella kuivatusjärjestelmä mahdollisti betonin kuivumisen myös päällystämisen jälkeen. Kuivatusjärjestelmän avulla suhteellista kosteutta saatiin laskettua päällystämisen jälkeen arviointisyvyydellä noin 5 %-yksikköä tasolta 93...94 % RH tasolle 88...89 % RH. Tutkimuksessa havaittiin, että betonin pintaosien kosteuspitoisuus nousee vain muutamia %-yksikköä ja koejärjestelyissä päällystettyjen alueiden betonin pintaosien suhteellinen kosteus laski mittausjakson aikana pääl-

lystämishetken tasoon 85 % RH. Viiltomittausten mukaan kiinnitysluimakerroksen kosteuspitoisuus oli korkeampi. Viiltomittausmenetelmä soveltuu kosteusmittausohjejulkaisuiden mukaan kuitenkin heikosti vaihteleviin työmaolosuhteisiin. Tästä syystä tulosten tulkinnassa painotetaan näytepalamittautuloksia, joiden tuloksiin vaihtelevilla olosuhteilla ei ole vaikutusta.

Verrokkialueen suhteellinen kosteuspitoisuus saavutti arviointisyvyydellä päällystettävyyden yleisen raja-arvon 85 % RH vasta mittausjakson lopulla eli 178 vrk kuluttua valusta. Koejärjestelyiden päällystystyöt tehtiin ajanhetkillä 36 ja 57 vrk valusta rakenteen suhteellisten kosteuspitoisuuksien ollessa arviointisyvyydellä 8...9 %-yksikköä ja pintaosissa 10 %-yksikköä yleisiä raja-arvoja korkeampia. Erittäin aikaisesta päällystämishetkestä huolimatta betonin pintaosien suhteelliset kosteuspitoisuudet betonin pintakerroksessa saatiin kuivatusjärjestelmän avulla pysymään lähes alle kriittisen kosteuspitoisuuden. Kuivatus- ja mittausjakso keskeytettiin työmaa-aikataulujen takia haluttua aiemmin. Kuivatuksen jatkamisella olisi voitu alentaa rakenteet suhteellisia kosteuspitoisuuksia edelleen. Oikea-aikaisen päällystämishetken määrittäminen vaatii lisätutkimuksia, mutta tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että kuivatusjärjestelmällä saavutettiin huomattavaa etua lattianpäällystevaurioiden syntymistä vastaan.

Koekohteessa B suhteellinen kosteus arviointisyvyydellä laskee mittausjakson aikana molemmilla mittausalueilla tasolle 85...86 % RH. Mittausjakson loppupuolella on havaittavissa selkeästi, että rakenne kuivuu nopeammin kosteudenkeruuputkien ympäristöstä kuin kauempana putkesta, mikä on havaittavissa kuvan 6.2 viimeisistä kosteuskäyristä.



Kuva 6.2. Suhteellisen kosteuden mittauksista koottuja kosteusprofiileja eri mittauskerroilta. Käyrien värit on valittu mittausvyöhykkeittäin siten, sinisellä kuvatut käyrät ovat kauimpana kosteudenkeruuputkesta (vyöhyke d), punaiset käyrät lähimpänä kosteudenkeruuputkea (vyöhyke a) ja muut värit näiden väliltä vyöhykkeiltä b ja c. Ajanhetkellä 218 vrk valusta pisteestä MP1A (70) mitattu poikkeavan alhainen tulos on todennäköisesti mittausvirhe.

Koekohteen B rakennekosteusmittausten perusteella kuivatusjärjestelmällä on selkeästi kuivattava vaikutus, vaikka mitatut kosteusvirran arvot olivat melko alhaisia. Kuivumista

on tapahtunut selkeästi myös aikavälillä 103...218 vrk, vaikka rakenteen pintaosat ovat kastuneet rakentamisen aikana toistuvasti ja kuivuminen yläpinnan kautta on ollut vähäistä. Tehtyjen mittausten perusteella ei voida arvioida täsmällisesti kuivatusjärjestelmän vaikutusta rakenteen kuivumisaikaan, koska käytettävissä ei ollut verrokkirakennetta. Kuivumisaika-arvioiden laskentaohjelman (BY 1021) mukaan 300 mm paksulle massiivibetonivälipohjalle kuivumisaika-arvio raja-arvoon 85 % RH on noin 330 vrk. Koekohteen 400 mm massiivibetonivälipohjan suhteellinen kosteuspitoisuus arviointisyvyydellä laski mittausjakson aikana 275 vrk valusta tasolle 85 % RH. Onkin todennäköistä, että kosteudenkeruukanaviston vaikutus kuivumisaikaan on huomattava.

Kuivuminen on ollut huomattavasti nopeampaa kosteudenkeruuputken ympäriltä ja putkien keskellä kuivatusjärjestelmän kuivattava vaikutus on ollut huomattavasti vähäisempää. On huomionarvoista, että putken ympärille muodostuva kuivempi vyöhyke mahdollistaa kosteuden tasaantumisen putkijaon keskeltä kohti kuivempaa vyöhykettä. Tämä kuivumisilmiön voidaan ajatella muodostavavan rakenteelle niin sanotun kolmannen kuivumissuunnan. Kuivatettaessa paksun rakenteen keskipaksuutta, edesautetaan pintaosaa kuivumaan sisäilman lisäksi kuivempaan keskivyöhykkeeseen ja siten nopeutetaan päällystyskelpoisuuden saavuttamista.

Lattian päällystämisen kannalta oleellista on rakenteen pintaosien suhteellinen kosteuspitoisuus. Kuivattavan vaikutuksen optimoimiseksi selkeäksi jatkotutkimustarpeeksi nousee betonilaadun vaikutuksen lisäksi erityisesti suurissa rakennepaksuuksissa kosteudenkeruupiirien korkeusaseman, putkijaon ja kolmannen kuivumissuunnan vaikutus pintaosien suhteellisen kosteuspitoisuuden kehittymiseen. Ensi vaiheessa edellä esitettyä tarkastelua on todennäköisesti tarkoituksenmukaisinta tehdä rakennusfysikaalisilla mallinnoilla, jotta tarkasteluun saadaan mukaan riittävä määrä eri variaatioita.

6.3 Sovellusohjeet päällystettävyyden arviointiin

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli laatia sovellusohje olemassa olevien ohjejulkaisuiden soveltamiseen arvioitaessa tutkittavalla kuivatusjärjestelmällä varustettujen lattiarakenteiden päällystettävyyttä.

Mittauskohta tulee lähdekirjallisuuden mukaan lähtökohtaisesti valita rakenteen kosteimmalta alueelta eli kuivatusjärjestelmällä varustetussa lattiassa kosteudenkeruuputkien keskiväliltä. Mikäli mittauskohdan valinnassa halutaan poiketa tästä, tarvitaan kosteuskentän jakaantumisesta tarkempaa tutkimustietoa.

Putkien sijainti tulee dokumentoida tarkasti jo ennen valua ja lisäksi kosteudenkeruupiirien sijainti mittauskohdan lähistöltä tulee varmistaa lämpökameralla ennen kosteusmittauksia. Lämpökameralla saadaan kosteudenkeruuputkien paikat selvästi esiin tavanomaisilla rakennepaksuuksilla (100...200 mm) kuvattaessa lattian pintaa muutama tunti kuivatusjärjestelmän käynnistämisen jälkeen. Tätä paksummilla rakennepaksuuksilla

kosteudenkeruupiirien sijaintia ei välttämättä pystytäkään paikallistamaan lämpökameralla, jolloin joudutaan turvautumaan ainoastaan ennen valua tehtyyn dokumentointiin.

Aiemmissa tutkimuksissa (Leivo et. al. 2005) on todettu, että päällystämisen jälkeen tavanomaisen betonilattiarakenteen pystysuuntaisen kosteuskajauma tasaantuu siten, että syvemmältä laatasta siirtyy kosteutta betonilaatan pintaosiin ja kiinnitysliimakerrokseen. Betonin lämpötilan nosta nostaa betonin suhteellista kosteutta ja tehostaa lisäksi kosteuden siirtymistä lämmityselementin ympäristöstä ympäröivään betoniin. Tästä syystä lämmityksessä rakenteessa lattiapäällysteen alapinnan suhteellinen kosteuspitoisuus nousee nopeammin ja saavuttaa korkeamman maksimikosteuspitoisuuden kuin lämmittämättömässä laatasta. Johtopäätös pätee lämpötilan vaikutuksen osalta myös tarkasteltavalla kuivatusjärjestelmällä varustetulla rakenteella.

Päällystettävyyden arvioinnissa lähtökohtana on, että betonin pintaosissa tulee päällystysyhteydellä olla riittävästi kapasiteettia ottaa vastaan päällystysmateriaalien mukana tulevaa ja syvemmältä rakenteesta kulkeutuvaa kosteutta vastaan ilman, että suhteellinen kosteuspitoisuus betonin ja lattianpäällysteen rajapinnassa nouse pitkäksi ajaksi yli kriittisen kosteuspitoisuuden. Olemassa olevissa päällystysohjeissa muovimattopäällysteiltä edellytetään 75 % suhteellista kosteuspitoisuutta betonin pinnassa ja välisyvyydellä (0,4 x arviointisyvyys). Arviointisyvyydellä edellytetään vähintään kosteusraja-arvon 85 % RH saavuttamista. Koekohteen A koejärjestelyissä rakenteen pintaosien kosteuspitoisuus oli päällystysyhteydellä 85 % RH ja arviointisyvyydellä 93...94 % RH. Betonin pintaosien kosteuspitoisuuden nousu oli hyvin maltillista ja kosteuspitoisuus välisyvyydellä ja syvemmällä jatkoi laskemistaan.

Alustaan liimattaville tiiviille ja yhtenäisiksi hitsattaville mattopäällysteille voidaan tutkimuksen perusteella esittää, että kuivatusjärjestelmällä varustettujen rakenteiden osalta voidaan soveltaa seuraavia kosteusraja-arvoja: betonin pinta 70 % RH, välisyvyys 80 % RH ja arviointisyvyys 90 % RH. Lisäksi päällystämisen jälkeisen kuivatuksen aikana kuivatusjärjestelmän menoilman lämpötila tulee pitää alle tutkimuksessa käytetyn 40 °C. Ehdotetuista raja-arvoista pintakerroksen ehdotus on vaativampi kuin nykyisissä ohjeissa edellytetty 75 %. Syvemmällä rakenteessa ehdotetut raja-arvot ovat nykyisiä ohjeistuksia korkeampia. Rakenteen pintakerroksen tiukempaa minimivaatimusta olisi suositeltavaa käyttää myös muissa lattialämmityksissä rakenteissa. Pintakerroksen kuivattaminen tasolle 70 % RH toteutuu tavanomaisissa kuivatusolosuhteissa tavanomaisesti enemmin kuin väli- ja arviointisyvyyden vaatimukset.

Erityisen paksujen valujen tapauksessa voidaan tutkimuksen perusteella sanoa, että kuivatusjärjestelmällä voidaan alentaa rakenteen keskiosien kosteuspitoisuutta suhteessa normaaliin rakenteeseen. Erityisesti kosteudenkeruuputkijakoa tihentämällä päästään todennäköisesti tilanteeseen, jossa kosteuspitoisuus rakenteen keskiosissa on alhaisempi kuin arviointi- ja välisyvyydellä. Tällöin päällystämisen jälkeen kosteuskajuman tasaantuessa rakenteen pintaosien kosteuden nousu on oletettavasti huomattavasti tavanomaista

rakennetta vähäisempää ja kosteus arviointisyvyydeltä pääsee jopa tasaantumaan rakenteen keskiosaan päin. Tutkimuksen perusteella voidaan ehdottaa, että paksujen betonirakenteiden ≥ 300 mm osalta rakenteen mittaussyvyydet voitaisiin määrittää olemassa olevia ohjeistuksia soveltamalla siten, että rakennetta tarkastellaan kahteen suuntaan kuivuvana rakenteena, jonka rakennepaksuus on $0,5 \times$ todellinen rakennepaksuus. Tällöin arviointisyvyydeksi esimerkiksi koekohteen B rakenteelle saataisiin $400 \text{ mm} \times 0,5 \times 0,2 = 40 \text{ mm}$ ja välisyvyydeksi $0,4 \times 40 \text{ mm}$ eli 16 mm. Soveltaen määritetyillä mittaussyvyyksillä ehdotetaan käytettäväksi olemassa olevien ohjeistusten kosteusraja-arvoja. Edellä esitetyillä mittaussyvyyksillä järjestelmällä saavutettaisiin huomattavia etuja kuivumisajoissa erityisesti kuivumisen kannalta tahdistavilla erityisen paksuilla rakennepaksuuksilla.

Ennen edellä ehdotettujen soveltamisohjeiden käyttöön ottoa suositellaan rakenteiden suhteellisen kosteuden jakaantuminen eri rakenteissa varmistaa rakennusfysikaalisilla mallinnuksilla tai hallituissa laboratorio-olosuhteilla tehtävillä käytännön koejärjestelyillä. Paksujen rakenteiden osalta tulee lisäksi optimoida kosteudenkeruupiirien putkijakoja siten, että rakenteen kosteusjakauma saadaan asettumaan siten, että rakenne on päällystämishetkellä kuivempi rakenteen keskiosasta kuin tavanomaisesti määritetyillä arviointisyvyydellä.

Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että käytettäessä olemassa olevia kosteusraja-arvoja ja tarkasteltavaa kuivatusjärjestelmää saavutetaan huomattavaa lisävarmuutta lattianpäällystevaurioita vastaan.

6.4 Kuivatusjärjestelmän toimivuus, sovelluskohteet sekä kehitysehdotukset

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli tarkastella järjestelmän toimintaa ja soveltuvuutta suuren kokoluokan rakennustyömailla. Tutkimuksen kokemuksen perusteella kuivatusjärjestelmä toimii teknisesti hyvin ja on skaalattavissa myös suuriin rakennuskohteisiin.

Kuivatusjärjestelmästä saatujen tutkimustulosten ja käyttökokemusten perusteella järjestelmälle voidaan nähdä tarkoituksenmukaisia käyttösovelluksia muun muassa seuraavissa käyttökohteissa:

- Paksut kosteusherkillä materiaaleilla päällystettävät betonirakenteet
- Erikoistilojen lattiarakenteet, joilta halutaan poikkeuksellista kosteusteknistä lisävarmuutta ja vikasietoisuutta
- Korjauskohteissa erityisesti maanvastaiset rakenteet, joissa ei ole mahdollista tai tarkoituksenmukaista estää maaperän kosteuden nousua rakenteen ulkopuolisella salaojituksella, injektoinnilla eikä vedeneristyksellä.
- Kaikki rakenteet, joiden kuivumisaikoja on haastavaa saada riittävän lyhyiksi tavanomaisin kuivatuskeinoin

Kuivatusjärjestelmän teknisestä suoriutumisesta nousi tutkimuksessa esiin muutamia detaljitason parannuskohteita, joiden kehittämiseen saatiin arvokasta kokemusta ja palautetta työmaalla toimivilta tahoilta.

Merkittävimpiä esiin nousseita kehityskohteita olivat kosteudenkeruukanaviston asennettavuuteen ja liitososien työmaakestävyysliittymien liittyvät tekijät. Kosteudenkeruuputkien materiaali on kevyttä ja putken poikkipinta-ala on moninkertainen verrattuna esimerkiksi vesikiertoisen järjestelmän lattialämmityspotkeen. Tästä johtuen kosteudenkeruuputkiin kohdistuu valuvaiheessa voimakas noste, joka pyrki nostamaan kosteudenkeruupiirejä kohti valun pintaa. Kosteudenkeruuputken nouseminen lähelle pintaa vaikeuttaa tasaisemman valupinnan työstöä, heikentää paikallisesti lattiapinnan kestävyyttä ja erityisesti ohuilla rakenteilla voi aiheuttaa lattian halkeiluriskiä. Tavanomaisesti nosteen vaikutus hoidetaan kanaviston päälle asennettavalla rauditusverkolla. Mikäli rauditusverkkoa ei käytetä, tulee kanavisto muuten lukita nostetta vastaan. Vesikiertoisen lattialämmityspotkien asennusohjeissa (Uponor Lattialämmityksen asennus- ja käyttöohje) kiinnitettäessä lattialämmityspotkia rauditukseen kiinnityskohtien maksimietäisyyksiksi on määritetty 750 mm suoralla osuudella ja 200 mm päätykaarien osuudella. Koekohteessa A, jossa kosteudenkeruuputkien noste koettiin ongelmaksi, kiinnitysvälit olivat noin 1200 mm. Kosteudenkeruuputki on huomattavasti lattialämmityspotkea jäykempää, mikä vähentää putken kaareutumista kiinnityspisteiden välillä, mutta toisaalta noste on suuremmasta poikkileikkauspinta-alasta johtuen suurempaa. Taipuisien mutka- ja kiinnitysosien heikko jäykkyys puoltaa tiheämpää kiinnitysväliä mutkakohdissa. Tutkimuksen kokemusten perusteella edellä mainittuja vesikiertoisen järjestelmän lattialämmityspotkelle määritettyjä maksimietäisyyksiä on suositeltavaa noudattaa myös asennettaessa tarkasteltavan kuivatusjärjestelmän kosteudenkeruuputkea ilman rauditusverkkoa.

Koekohteesta B saatu palaute joustavien mutka- ja liitososien heikosta asennettavuudesta ja työmaakestävyydestä kannattaa huomioida jatkokehityksessä. Tässä tutkimuksessa ei kokeiltu standardikokoisten 50 mm muoviviemäriosien yhteensopivuutta kosteudenkeruuputken kanssa. Viemäriosien helppo saatavuus ja kestävyys puoltavat niiden käyttöä.

Koekohteessa B kuivatuslaitteiston ja kuivatuskanaviston välillä käytettiin taipuisaa alumiinilaminoitua haitariputkea. Käytetty alumiiniputki ei saatujen kokemusten perusteella sovellu työmaaolosuhteisiin paikkoihin, joissa se on alttiina mekaanisille iskuille. Haitariputkea voidaan käyttää esimerkiksi katto- tai seinäasennuksissa, kunhan lähellä lattianrajaa kosteudenkeruukanaviston ja haitariputken liittämiseen käytetään työmaaoloissa kestäviä kanavaosia.

Molemmissa kohteissa esiintyneet sähkönsyöttöongelmat johtuvat pitkälti työmaiden puutteellisista järjestelyistä. Ongelmia voidaan jatkossa ehkäistä kytkemällä kuivatuslaitteisto kuivatusaikojen kannalta kriittisissä kohteissa kiinteästi työmaasähköön, jolloin voidaan poissulkea riski sille, että muut työmaalla toimivat työnsuorittajat keskeyttävät

kuivatuslaitteiston käynnin. Yhtenä osittaisena ratkaisuna voidaan käyttää myös etäseurattavaa olosuhdeseurantaa, jolloin saadaan nopeasti tieto kuivatuslaitteiston toimintahäiriöistä ja voidaan reagoida niihin mahdollisimman nopeasti

LÄHTEET

- Ahvenainen, V. (2016). *Betonilaatan kuivatus lämminilmaputkistolla*. Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- Betong handbok*. (1997). Svensk byggtjänst.
- Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet*. (2007). Suomen Betonitieto Oy, Betonikeskus ry.
- Betonitekniikan oppikirja by 201*. (2018). Suomen betoniyhdistys ry.
- Betonitekniikka RIL 119*. (1979). Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y.
- Eduskunta. (1999). *Maankäyttö- ja rakennuslaki 1999/132*.
- Finnsementti. (2017). *Ympäristöraportti 2017*. Haettu 21. 3 2018 osoitteesta <http://finnsementti.fi/sementti/valmistus>
- Hall, C.;& Hoff, W. D. (2002). *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*. Spon Press.
- Iso-Mustajärvi, P. (2013). *RTEK-3140 Betonitekniikka*. Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- Järnström, H. (2005). *Muovimattopinnoitteisen lattiarakenteen VOC-emissiot sisäilmatapauksissa*. VTT julkaisu 571. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka.
- Kanare, H. M. (2005). *Concrete Floors and Moisture*. Portland Cement Association.
- Keinänen, H. (2013). *Hyvät tutkimustavat betonirakenteisten lattioiden muovipäällysteiden korjaustarpeen arviointiin*. Itä-Suomen yliopisto.
- Lehtimäki, P.;& Tommola, E. (2015). Talon lattioiden kuivattaminen ilmakiertoisella lattialämmitysjärjestelmällä. *Rakennusfysiikka 2015, Uusimmat tutkimustulokset ja käytännön ratkaisut*. Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- Leivo, V.;& Pentti, M. (2016). *Tulilattia- lämmitysjärjestelmän lämpö- ja kosteustekninen toiminta asunomessutalossa, Tutkimusselostus nro TRT/2390/2016*. Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- Leivo, V.;& Rantala, J. (2003). *Moisture behaviour of slab-on-ground structures*. Tampere university of technology.

- Leivo, V. & Rantala, J. (2005). *Lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toiminta*.
- Maijala, J. (2017). *Ilmakiertoisen lämmitys- ja kuivatusjärjestelmän soveltuvuus saneerauskohteeseen, opinnäytetyö*. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Merikallio, T. (2002). *Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi*. Betonikeskus ry, Rakennustieto Oy.
- Merikallio, T. (2009). *Betonilattian "riittävän" kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa*. Väitöstutkimus, Teknillinen korkeakoulu.
- Merikallio, T.; Niemi, S. & Komonen, J. (2007). *Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen*. Betonitieto Oy, Betonikeskus ry.
- Miettunen, K. & Wirtanen, L. (2018). Muovimatolla päällystetyt betonilattiat - ratkaisuja haasteisiin? *Sisäilmastoseminaari 2018*. Sisäilmayhdistys ry.
- Mäkikyrö, T. (2017). *Betonirakentamisen laatuketju kuntoon, taustalla vuoden 2016 lujuuskadot*. Rakennusteollisuus RT.
- Neville, A. M. (1973). *Properties of Concrete*. Pitman Publishing.
- Niemi, S. (2010). Betonirakenteiden kosteuden mittaaminen ja onnistunut päällystäminen. *Rakentajainkalenteri 2010*.
- Niemi, S. (2019). Kokemuksia betonirakenteiden päällystämisen ohjeiden soveltamisesta ja tarkennusehdotuksia. *Sisäilmastoseminaarijulkaisu 2019*.
- Nilsson, L.-O. (1979). *Fuktmätning, Del 2 av byggfukt i betongplatta på mark, Torknings- och mätmetoder*. Byggnadsmaterial, LTH. rapport TVBM-3008.
- Oksanen, I. (2017). *Betonirakenteen kuivatus - kuivatusjärjestelmä kosteusvauriotilanteessa, opinnäytetyö*. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Outinen, K. (2017). *Perustelumuuisto*. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen kosteusteknisestä toimivuudesta: Ympäristöministeriö.
- Persson, B. (2003). *Golvsystem på betong. Fuktpåverkan, kemisk emission och vidhäftning*. Lund tekniska högskola.
- Pihkala, J. (2011). *Prosessitekniikka*. Opetushallitus.
- RT 14-10984 *Betonin suhteellisen kosteuden mitta*. (2010). Rakennustieto Oy.

- ry, R. R. (2017). Lattioiden muovimattoemissioiden torjuminen -tutkimus käynnistyy .
tiedote 1.2.2017.
- Siikanen, U. (2001). *Rakennusaineoppi*. Rakennustieto Oy.
- SisäRYL 2010. *Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset, Talonrakennuksen sisätyöt.*
(2010). Rakennustietosäätiö.
- SisäRYL 2013. (2012). *Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset, Talonrakennuksen sisätyöt.* Rakennustietosäätiö RTS.
- Suomen Rakentamismääräyskokoelma. (1998). *RakMK C2 Kosteus, määräykset ja ohjeet*. Ympäristöministeriö.
- Suomen RakMk osa C2.* (1998). Ympäristöministeriö.
- Terveysuojelulaki 763/1994.* (1994). Eduskunta.
- Viitanen, H.;Vinha, J.;Salminen, K.;Ojanen, T.;Peuhkuri, R.;Paajanen, L.;& Lähdesmäki, K. (1 2010). *Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures, Journal of Building Physics, nro 33, pp. 201-224.*
- Vinha, J. (2011). *Rakennusfysiikka luentomoniste*. Tampereen teknillinen yliopisto.
- YM 782/2017. (2017). *Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta.*
- Ympäristöministeriö. (2015). *Ympäristöopas 28. Kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus - luonnosversio 23.1.2015.* Ei julkaistu.

LIITTEET

LIITE A: Mittauspöytäkirja, koekohde A

LIITE B: Mittauspöytäkirja, koekohde B

Koekohde A, viiltomittaukset												
pvm. ja aika valusta				17.7.2017	1.8.2017	16.8.2017	1.9.2017	20.9.2017	12.10.2017	10.11.2017	7.12.2017	4.1.2018
				7 vrk	22 vrk	37 vrk	53 vrk	72 vrk	94 vrk	123 vrk	150 vrk	178 vrk
MP2	0	A				91,3	90,3	89,0			92,5	87,4
						13,4	12,7	19,7			20,0	17,3
		D				91,3	90,4	92,7			91,6	87,7
						13,0	12,4	20,8			20,0	17,7
MP3	0	A				0,0	90,3	93,9			90,8	90,8
						0,0	14,6	18,9			23,4	18,7
		D					88,6	94,4			95,7	88,7
							12,8	22,0			22,6	20,2

Koekohde B, näytepalamittaukset																							
pvm. ja aika valusta			17.5.2017 42 vrk			15.6.2017 71 vrk			14.7.2017 103 vrk			13.10.2017 191 vrk			9.11.2017 218 vrk			8.12.2017 248 vrk			5.1.2018 275 vrk		
koeputki			1	2	ka.	1	2	ka.	1	2	ka.	1	2	ka.	1	2	ka.	1	2	ka.			
MP1	5	D	65,3	64,6	65,0	84,5	86,1	85,3	92,0	93,3	92,7				65,1	66,0	65,6				61,0	60,2	60,6
			21,4	21,4	21,4	21,2	21,2	21,2	20,0	19,9	20,0				21,2	21,1	21,2				21,1	21,0	21,1
	30	D	92,8	91,6	92,2	91,6	90,6	91,1	91,1	90,1	90,6				84,1	83,0	83,6				76,1	77,8	77,0
			21,4	21,4	21,4	21,2	21,3	21,3	20,1	20,1	20,1				21,2	21,3	21,3				20,9	20,9	20,9
	70	D	97,1	94,2	95,7	94,8	93,5	94,2	93,3	93,4	93,4				88,5	90,4	89,5				84,5	84,3	84,4
21,4			21,4	21,4	21,3	21,2	21,3	19,9	19,9	19,9				21,0	21,1	21,1				21,0	21,1	21,1	
MP2	5	D							90,0	91,0	90,5				72,8	71,3	72,1	91,3	90,4	90,9	59,4	58,0	58,7
									20,1	20,1	20,1				21,1	21,1	21,1	21,8	21,9	21,9	21,0	21,2	21,1
	30	D							92,6	93,0	92,8				86,0	86,1	86,1	85,2	87,2	86,2	81,6	80,2	80,9
									19,9	19,8	19,9				21,0	21,0	21,0	22,1	22,1	22,1	20,9	20,8	20,9
	70	D							92,4	92,8	92,6				90,0	91,0	90,5	89,4	88,0	88,7	85,8	85,1	85,5
								20,1	20,0	20,1				21,5	21,2	21,4	22,0	21,9	22,0	21,1	21,0	21,1	

Koekohde B, mittauputkimittaukset																						
pvm. ja aika valusta			17.5.2017 42 vrk		15.6.2017 71 vrk		14.7.2017 103 vrk		13.10.2017 191 vrk		9.11.2017 218 vrk		8.12.2017 248 vrk		5.1.2018 275 vrk							
MP1	30	A			95,5			89,8			86,4			82,2			78,1			79,2		
						23,3			19,7			18,3			18,7			14,6			22,8	
		C			95,6			89,1			85,3			81,2			80,1			79,9		
						22,7			19,6			18,1			18,4			14,8			22,7	
		D			95,5			90,1			88,6			83,8			83,6			82,1		
						22,8			19,8			18,0			18,4			15,1			22,7	
	70	A			95,4			93,5			89,6			71,1			86,5			88,6		
						23,4			19,7			19,2			19,2			15,1			23,0	
		C			95,0			94,1			0,0			90,0			87,4			89,3		
						23,3			20,3			0,0			18,9			15,5			23,1	
		D			97,5			92,6			89,7			90,6			87,1			88,2		
						22,5			19,7			22,5			19,7			15,3			22,8	
	160	A			97,4			95,6			88,3			85,0			82,8			84,9		
						23,7			21,1			21,8			20,5			16,3			24,2	
	200	B			97,3			95,4			89,7			87,1						86,2		
						23,3			21,5			22,5			21,8					24,4		
		C			95,1			95,3			92,7			90,6			89,3			90,0		
						23,1			21,1			21,5			21,0			16,0			24,2	
		D			96,1			95,4			94,5			92,6			91,4			92,3		
						22,9			21,4			21,0			20,0			16,1			23,9	
MP2	30	A						92,4			87,8			81,9			80,4			80,3		
									18,8			18,8			18,1			15,3			23,2	
		C							92,4			87,2			82,6			81,9			81,4	
									19,1			18,0			18,4			15,5			23,1	
		D							94,9			85,3			84,4			81,5			81,0	
									19,5			19,0			18,9			15,9			23,3	
	70	A							95,2			91,4			88,5			88,4			86,6	
									19,1			19,6			19,2			15,6			23,6	
		C							95,5			92,0			88,4			87,6			87,8	
									19,6			19,2			19,6			15,7			23,5	
		D							95,5			92,4			88,3			87,1			88,8	
									19,2			19,4			18,9			16,1			23,0	
	160	A							96,2			90,8			85,4			84,5			87,2	
									20,2			21,7			21,3			16,2			25,0	
	200	B							94,9			91,0			86,6			84,9			87,3	
									20,6			22,7			21,4			17,0			24,9	
		C							96,0			91,8			90,2			88,6			91,3	
									20,7			21,8			20,5			16,9			24,3	
		D							95,5			93,2			92,4			92,0			92,8	
									20,8			20,6			20,1			17,0			23,7	